LA CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA

HELMHOLTZ

Sin fecha de caducidad



NATIONAL GEOGRAPHIC

HERMANN VON HELMHOLTZ es una de las personalidades científicas más influyentes de la segunda mitad del siglo XIX. Su voraz intelecto y sus profundos conocimientos, tanto en medicina como en física y matemáticas, le permitieron fusionar las más variadas disciplinas. De este modo, su contribución primera y más destacada, la formulación matemática de la ley de la conservación de la energía, invadió el terreno de la fisiología para conseguir medir la velocidad de los impulsos nerviosos. La óptica también fue objeto de estudio del científico alemán, con su teoría de la visión y la invención del oftalmoscopio y del oftalmómetro, y en acústica investigó la propagación del sonido y su percepción por el oído humano, relacionando la fisiología con la armonía y la música.

LA CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA

HELMHOLTZ

Sin fecha de caducidad

NATIONAL GEOGRAPHIC

JOSÉ ENRIQUE AMARO SORIANO es doctor en Ciencias Físicas y profesor titular de la Universidad de Granada en el Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear. Es investigador del Instituto Carlos I de Física Teórica y Computacional y posee la acreditación nacional de catedrático. Ha realizado estancias de investigación en el MIT y cuenta con más de cien publicaciones científicas de física nuclear. Actualmente estudia la interacción de los neutrinos y la fuerza nuclear.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: Luz de la Mora

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: Archivo RBA: 29b, 41; G. Berger/Biblioteca Nacional de Medicina de Estados Unidos: 23; Biblioteca del Congreso de Estados Unidos: 141; Giacomo Brogi/Zeno.org: 146; Colecciones Científicas de la Universidad Humboldt, Berlín: 62; Adolf Dauthage/Biblioteca Nacional de Austria: 29ad; Hermann von Helmholtz/*Physiologische Graphik*: 87ai; Hermann von Helmholtz/*Sobre las sensaciones del tono*: 101ad, 106, 116a, 116b, 121; Hermann von Helmholtz/*Tratado de óptica fisiológica*: 87ad; 87b; Dr. Sebastian Husen/Picture Library East Prussia: 57; Meisenbach Riffarth & Co./Journal of Physical Chemistry: 38; Dr. S.J. Meltzer/Popular Science Monthly: 133b; Adolf Menzel/ Antigua Galería Nacional de Berlín: 20; Karl Pfaff: 101b; Popular Science Monthly: 97, 101ad; Henry Roscoe: 44; Smithsonian Institution Libraries: 37; Universidad de Toronto: 29ai; Eric W. Weisstein: 133ai; Anton von Werner/Antigua Galería Nacional de Berlín: 133ad.

ISBN: 978-84-473-7775-6
Depósito legal: B-18562-2016

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - *Printed in Spain*

Sumario

Introducción

En 1906 el gran físico británico William Thomson, más conocido como lord Kelvin, redactó el prefacio de la edición inglesa de la biografía de su amigo y colega Hermann von Helmholtz, escrita por el matemático Leo Königsberger ocho años después de su muerte, acaecida en 1894. Kelvin destacó cuatro aspectos de la vida de Helmholtz: su sin par carrera profesional, la creación del Instituto Imperial de Física y Tecnología, su discurso sobre las ideas de Faraday y su influencia sobre Hertz, el descubridor de las ondas electromagnéticas.

Kelvin detalló la trayectoria profesional de Helmholtz, que había ascendido por una larga cadena de puestos, comenzando por el de cirujano militar en el ejército prusiano durante cinco años. Luego fue profesor de Anatomía en la Academia de Bellas Artes de Berlín, un año; profesor de Patología y Fisiología en Königsberg, seis años; profesor de anatomía y fisiología en Bonn, tres años; profesor de Fisiología en Heidelberg, trece años; profesor de Física en Berlín, dos décadas, y, finalmente, director del Reichsanstalt (el Instituto Imperial de Física y Tecnología de Berlín) en la última etapa de su vida.

En segundo lugar, Kelvin elogió la creación del Reichsanstalt por Helmholtz y Von Siemens «por los inestimables beneficios que ha proporcionado no solo a Alemania, sino al mundo entero». En el aspecto científico, el físico británico resaltó el discurso de

Helmholtz en la Sociedad de Química de Londres sobre los avances de la electricidad de Faraday. Según Kelvin, dicha ponencia «marcó época como un monumento al progreso científico del siglo XIX, en virtud de la declaración, hecha por vez primera, de que la electricidad consistía en átomos». Esta teoría fue corroborada pocos años después de la muerte de Helmholtz por una serie de hallazgos que comenzaron con el descubrimiento de la radiactividad por parte de Henri Becquerel. Los átomos de electricidad a los que Helmholtz y Kelvin se referían eran, por supuesto, los electrones. Finalmente, según Kelvin, «el mundo está en deuda con Helmholtz por haber inspirado a Hertz para encontrar la prueba experimental de las ondas eléctricas de Maxwell. En Helmholtz encontramos un factor determinante en la gran serie de investigaciones teóricas y experimentales que condujeron a la telegrafía sin hilos».

En este breve prefacio, Kelvin reseñó tan solo algunos de los logros que contribuyeron a que Hermann von Helmholtz, personalidad polifacética de impresionante amplitud intelectual, llegara a ser uno de los más importantes científicos del siglo XIX, que incluso atisbó la frontera entre la física clásica y la física moderna. Considerado en su tiempo como el primer hombre de ciencia de Alemania, Helmholtz alcanzó un renombre en Europa y Estados Unidos semejante al que Albert Einstein tuvo en la primera mitad del siglo XX. Hoy en día, transcurridos más de cien años de su muerte, los vestigios de su renombre perduran en los libros de texto universitarios y, por ende, en la memoria colectiva de los científicos, principalmente los físicos, los fisiólogos, los psicólogos y los neurólogos.

Helmholtz fue reconocido por su formulación de la ley de conservación de la energía y por la invención del oftalmoscopio. Estos dos logros tan solo encabezan su larga lista de contribuciones a la fisiología, la física teórica, la filosofía de la ciencia, las matemáticas, la psicología, la neurociencia y la percepción. En física, su nombre está asociado a las áreas más diversas, desde el electromagnetismo a la termodinámica, pasando por la óptica, la acústica y la teoría de fluidos. Llevan su nombre el teorema de Helmholtz, la energía libre de Helmholtz, la ecuación de Helmholtz, los reso-

nadores de Helmholtz y las bobinas de Helmholtz, entre otros teoremas matemáticos, ecuaciones, magnitudes físicas y aparatos.

Su producción científica se caracterizó no solo por su diversidad, sino también por su carácter multidisciplinar, abarcando tanto las ciencias biológicas como las físicas. Sus trabajos más importantes, realizados antes de 1870, se encuentran en la frontera entre dos ciencias: la física y la fisiología, como demuestra el descubrimiento de la velocidad de propagación de los impulsos nerviosos. Debe tenerse en cuenta que Helmholtz era un médico con profundos conocimientos de física y matemáticas. De joven había querido ser físico, pero las circunstancias económicas familiares le impulsaron a estudiar medicina. No obstante, su predilección por la física y su adiestramiento médico, combinados con un intelecto insaciable y el momento histórico propicio que atravesaba la ciencia alemana, le permitieron emprender una actividad científica sin par y difícil de abarcar. De ahí proviene tal vez la admiración que Einstein le profesaba, y que expresó en una carta a su futura esposa, Mileva Marić, en 1899.

Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz nació en Potsdam (Alemania) el 31 de agosto de 1821. Estudió medicina en Berlín, donde Johannes Müller lo animó a realizar investigaciones fisiológicas desde la vertiente de la física, un método de trabajo que sería su sello característico. Su carrera científica comenzó brillantemente en 1847, cuando, a la edad de veinticinco años, enunció la universalidad de la ley de conservación de la energía, demostrando su validez en el dominio fisiológico. Estudió la fisiología de los nervios y los músculos, y midió la velocidad de los impulsos nerviosos.

Entre 1850 y 1866 trabajó como físico, fisiólogo y psicólogo, desarrollando su teoría de la visión. Dilucidó la óptica geométrica del sistema visual, inventó el oftalmoscopio y el oftalmómetro, promovió una teoría de la visión y de la visión del color, y realizó estudios matemáticos del movimiento ocular y de la percepción visual del espacio. Todo este trabajo, tanto experimental como teórico, se plasmó en su histórica y monumental obra *Tratado de óptica fisiológica*, que fue un manual de referencia durante más de medio siglo.

La consideración pública de Helmholtz cambió enormemente a raíz de la invención del oftalmoscopio en 1850. Desde ese momento encontró el favor de las autoridades y de sus colegas, lo que le concedió total libertad para llevar a cabo su trabajo, el cual estaba guiado únicamente por su curiosidad científica. El investigador atribuía su éxito a sus circunstancias particulares, que lo habían situado con sus conocimientos de geometría y física entre los médicos, donde la fisiología era un suelo virgen y fértil por explorar, mientras que su familiaridad con los fenómenos de la vida lo predispuso a estudiar problemas fundamentales que normalmente habían permanecido fuera del ámbito de las matemáticas y de la física.

En sus trabajos de acústica fisiológica, Helmholtz elaboró una teoría de la función del oído interno, según la cual el órgano de la cóclea analiza un tono de acuerdo con sus frecuencias, y distintas frecuencias excitan distintas neuronas. En su libro *Sobre las sensaciones del tono como una base fisiológica de la teoría de la música* relacionó la acústica física y fisiológica con la armonía y la música, dedicando una especial atención al timbre, la combinación de tonos y la disonancia.

La característica principal de las investigaciones de Helmholtz fue unir simultáneamente diferentes áreas científicas empleando diversos métodos de análisis. Sus trabajos en acústica son un perfecto ejemplo de ello: realizó cálculos matemáticos de las vibraciones del aire en tubos, estudió los procesos fisiológicos en el oído y discutió problemas de teoría musical. Al mismo tiempo, diseñó nuevos instrumentos, realizó experimentos de alta precisión y formuló teorías. Su investigación en acústica fisiológica, al igual que la realizada en otras áreas de la ciencia, fue de naturaleza amplia, pero sintética.

Sus últimos años destacan por sus contribuciones a la física teórica, en particular a la teoría del electromagnetismo, la termodinámica química, los fundamentos mecánicos de la termodinámica, la mecánica teórica, la teoría de fluidos, la geometría no euclídea y la meteorología. Helmholtz contribuyó también al desarrollo de la epistemología y la filosofía de la ciencia, y a establecer la relación de la ciencia con el arte, la cultura y la sociedad. Fue,

además, un gran divulgador de la ciencia de su tiempo y publicó numerosos ensayos sobre los más variados temas científicos.

Fue asimismo pionero en el uso meticuloso de métodos empíricos en sus investigaciones fisiológicas, métodos que provenían en gran medida de la física y se basaban en datos experimentales y resultados de análisis matemáticos. Helmholtz era contrario a los métodos tradicionales de la filosofía natural, que interpretaba la naturaleza basándose en presuposiciones e ideas metafísicas inaccesibles a la experimentación. A menudo usó instrumentación científica, a veces de su propia creación, lo que le permitió alcanzar en sus experimentos un grado de rigor sin precedentes. Con su trabajo, contribuyó vigorosamente a erradicar de las ciencias biológicas las teorías vitalistas, que trataban de explicar la naturaleza de la vida mediante la metafísica.

Además de sus investigaciones en física y fisiología, Helmholtz fue una importante figura científica en Alemania. Dirigió institutos en Königsberg, Bonn, Heidelberg y Berlín. Diseñó y fue presidente fundador del Instituto Imperial de Física y Tecnología de Berlín, actual Agencia Alemana de Metrología, en la que se realizan medidas de alta precisión, revisando y actualizando los patrones de las unidades esenciales para la industria tecnológica. En la actualidad, la Agencia concede cada año el premio Helmholtz al mejor trabajo de investigación en el ámbito de la precisión. También fue rector de la Universidad de Berlín y, en sus últimos años de vida, lideró, en representación de Alemania, las delegaciones científicas y técnicas en los congresos internacionales.

Helmholtz murió el 8 de septiembre de 1894. A la ceremonia en su memoria asistió la familia imperial. La estatua que mandó erigir el emperador sigue situada hoy en día frente a la entrada de la Universidad de Berlín.

1821 Nace el 31 de agosto, en Potsdam (Alemania), Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz.

1838 Comienza sus estudios de medicina en Berlín, y se gradúa en 1842.

1843 Ingresa como médico cirujano en el regimiento de la Guardia Real en Potsdam. Inicia sus investigaciones sobre la acción muscular.

1847 Expone su disertación «Sobre la conservación de la fuerza» en la Sociedad de Física de Berlín.

1848 Es nombrado profesor de Anatomía en la Academia de Bellas Artes de Berlín.

1849 Es nombrado profesor de Fisiología en Königsberg. Contrae matrimonio con Olga von Velten, con quien tuvo dos hijos: Katherina y Richard.

1850 Mide la velocidad de propagación de los impulsos nerviosos. Inventa el oftalmoscopio. Inicia sus trabajos sobre la visión y la teoría del color.

1855 Es nombrado profesor de Fisiología y Anatomía en Bonn. Conoce a William Thomson (lord Kelvin).

1856 Publica el volumen I del *Tratado de óptica fisiológica*; el volumen II será publicado en 1860, y el III, en 1867. Comienza sus trabajos sobre acústica fisiológica.

1858 Publica sus primeros trabajos sobre la teoría de fluidos. Es nombrado profesor de Fisiología en Heidelberg.

1859 Muere Olga, su primera esposa.

1861 Contrae matrimonio con Anna von Mohl, con quien tuvo tres hijos.

1863 Publica *Sobre las sensaciones del tono como una base fisiológica de la teoría de la música*.

1870 Publica su primer artículo sobre la teoría de la electrodinámica.

1871 Es nombrado profesor de Física en Berlín.

1877 Es nombrado director del Instituto de Física y rector de la Universidad de Berlín.

1881 Realiza la lectura sobre Faraday en la Sociedad de Química de Londres.

1882 Comienza sus trabajos sobre termodinámica. Guillermo I le concede el título de barón.

1888 Es nombrado presidente del Instituto Imperial de Física y Tecnología.

1893 Viaja a Estados Unidos y tiene un accidente en el viaje de regreso.

1894 Muere el 8 de septiembre, de un derrame cerebral, en Charlottenburg, Berlín.

CAPÍTULO 1

La conservación de la energía

En la primera mitad del siglo XIX las leyes de la física clásica no estaban establecidas en su totalidad. El principio fundamental de la ley de conservación de la energía fue un descubrimiento simultáneo que puede datarse entre 1832 y 1852. Al menos doce científicos, entre ellos Julius von Mayer, James Prescott Joule y Hermann von Helmholtz, comprendieron los elementos esenciales del concepto de energía y su conservación. Helmholtz unificó esta ley, extendiéndola a una amplia clase de fenómenos, incluidos los pertenecientes al ámbito de la biología.

Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz nació el 31 de agosto de 1821 en Potsdam (Prusia). Su madre, Caroline Penne (1797-1854), era hija de un oficial de artillería descendiente de William Penn, el colono que fundó Pensilvania. Su padre, August Ferdinand Julius Helmholtz, nació en Berlín en 1792. En 1813 se enroló en el ejército prusiano y participó en la campaña contra Napoleón. Tras la batalla de Dresde, fue ascendido al rango de alférez. A su regreso, estudió filología clásica en la Universidad de Berlín y en 1820 obtuvo un puesto de profesor de instituto en Potsdam; allí impartía clases de lengua alemana, filosofía, griego y latín clásico, aunque también enseñó física y matemáticas. Era aficionado a la pintura y la filosofía, y escribía artículos y ensayos.

August y Carolina tuvieron seis hijos; Hermann era el mayor. Después nacieron Marie y Julie, y el segundo varón, Otto; más tarde tuvieron otros dos hijos que murieron en su infancia. Helmholtz fue un niño enfermizo, razón por la cual pasaba largas temporadas en su habitación, en compañía de sus libros de dibujos y sus juguetes, especialmente bloques de madera. Según su madre, Hermann era poco atractivo para la gente, pero esto a ella no le preocupaba, pues tras la sonrisa del niño veía su espíritu y su inteligencia. Helmholtz aprendió a leer en casa y, a causa de su delicada salud, hasta los siete años no pudo ir a la escuela, donde sorprendió a sus maestros con sus conocimientos intuitivos de

geometría, conocimientos que había adquirido jugando con los bloques de madera. En 1832 ingresó en el Instituto de Potsdam, donde pronto fue un alumno aventajado, a pesar de su insuficiente formación, especialmente en caligrafía, lo que Hermann suplía con su enorme capacidad de trabajo y grandes dosis de atención, entusiasmo y reflexión. Por otra parte, tenía mala memoria para recordar datos inconexos —incluso no le era fácil distinguir entre izquierda y derecha—, por lo que la gramática y la historia, tal y como se enseñaban entonces, eran una tortura para él.

FORMACIÓN INICIAL

La influencia de su padre fue determinante en el desarrollo intelectual de Helmholtz, ya que August estimuló en sus hijos el gusto por la poesía, el arte y la música. Les leía obras de Homero y les instruía en el dominio del lenguaje con ejercicios de poesía. De hecho, en aquella época, la música era una tradición en la clase intelectual alemana. Hermann tocaba el piano y practicaba a menudo en casa. Su amor por la música y sus conocimientos musicales orientarían en el futuro sus investigaciones en acústica.

Hermann solía salir de excursión con su padre y sus compañeros por los alrededores de Potsdam, una actividad que despertó en él su amor por la naturaleza. En la escuela le atraía más la física que las matemáticas y seguía con interés los experimentos de física y química. Le fascinaba el dominio intelectual sobre la naturaleza que proporcionaban las leyes físicas. Concibió la idea, recurrente a lo largo de su vida, de que el conocimiento de los procesos naturales era la llave que ponía en las manos de su poseedor la supremacía sobre la naturaleza, posibilitando su control.

Estudió todos los libros de física que encontró en la biblioteca de su padre. Junto con un amigo ensayaban experimentos sobre lo que habían leído y, usando unos anteojos y algunas lentes, construían instrumentos ópticos, modificándolos hasta encontrar alguna disposición interesante. En clase, durante las lecturas de Cicerón o Virgilio, calculaba bajo el pupitre las trayectorias de los

rayos en un telescopio. En aquella época Helmholtz descubrió diversos teoremas ópticos, infrecuentes en los libros de texto elementales, unos conocimientos que años más tarde le ayudaron en la construcción de su oftalmoscopio.

En casa atendía a las tertulias filosóficas a las que asistían los amigos de su padre. Las discusiones filosóficas eran comunes entre la sociedad culta de la época. Cuando Hermann oyó hablar del móvil perpetuo y de los intentos fallidos de los físicos para demostrar su viabilidad, se despertó en él la inquietud de estudiar este problema.

Cuando se aproximó la hora de pensar en la universidad, Helmholtz comunicó a su padre su deseo de dedicarse a la física. Pero la física no podía considerarse una profesión que le permitiera ganarse la vida. Teniendo que educar a cuatro hijos con su sueldo de profesor, su padre le explicó que no conocía otro modo que le permitiera estudiar física que iniciar estudios de medicina. Helmholtz no era contrario al estudio de las ciencias de la vida y aceptó la propuesta de buena gana.

August solicitó el ingreso de su hijo en la Escuela de Medicina del ejército, el Instituto Friedrich-Wilhelm de Medicina y Cirugía de Berlín, que proporcionaba a sus estudiantes una completa formación médica, así como alojamiento y manutención, todo ello de modo gratuito a cambio de que luego prestaran servicio militar como médicos cirujanos durante varios años. Gracias a la recomendación de un primo de su madre, la solicitud de Hermann fue admitida, aunque el ingreso en el Instituto estuvo condicionado a la superación de un examen.

El 28 de marzo de 1837 Hermann llegó a Berlín. Al día siguiente se dirigió al *Pépinière* (nombre con el que se conocía al Instituto de Medicina), donde se sometió a la revisión física. Al día siguiente realizó el examen, por escrito, en alemán y latín. De vuelta a Potsdam con la feliz noticia de haber superado la prueba, se dedicó con ahínco a finalizar sus estudios de bachillerato. En vista de su futura carrera médica, se interesó por la botánica, la zoología, la anatomía y la fisiología. En septiembre de 1838 pasó el examen de graduación con brillantes resultados. Helmholtz se dispuso entonces a iniciar su vida universitaria, consagrando su

POTSDAM Y FEDERICO II EL GRANDE

Históricamente, el rico ambiente cultural de Potsdam tuvo lugar en la época de la Ilustración gracias al impulso de Federico II de Prusia. Situada a 40 km al suroeste de Berlín, Potsdam tenía en aquella época una población de 20 000 habitantes y era un importante enclave militar, además de la residencia de recreo de la familia real, que construyó allí majestuosos edificios. Entre ellos destaca el palacio rococó de Sanssouci, lugar predilecto de Federico II el Grande, un edificio que ha sido declarado Patrimonio de la Humanidad. Federico II nació en 1712 y convirtió a Prusia en una gran potencia tras la Guerra de los Siete Años (1756-1763). Murió en el palacio de Sanssouci en 1786 y está enterrado en sus jardines. Representante del despotismo ilustrado, Federico II fue protector de la ciencia y la cultura, en particular de la música y la filosofía. Se llamaba a sí mismo «el filósofo de Sanssouci» y era un competente flautista. Por su corte desfilaron prestigiosos músicos y su clavecinista y músico de cámara fue Carl Philipp Emanuel Bach, hijo de Johann Sebastian Bach, que compuso sonatas y conciertos de flauta para ser interpretados por el propio rey. Entusiasmado por la ópera italiana desde que visitó Dresde cuando accedió al trono, Federico construyó un teatro de ópera en Berlín, que fue inaugurado en 1742. El monarca incluso escribió el libreto de una de las óperas de Carl Heinrich Graun, su maestro de capilla. En Sanssouci también tenían lugar tertulias culturales, en las que participó Voltaire entre 1750 y 1753. Federico el Grande recibió allí a Johann Sebastian Bach en 1747, encuentro en el que el rey sugirió el tema musical que Bach desarrolló con el título de *Ofrenda musical*.



Concierto de flauta con Federico el Grande en Sanssouci, óleo de Adolph von Menzel. En el lienzo aparecen, entre otros, el monarca, tocando la flauta, y C.P.E. Bach, tocando el clave.

futuro a las ciencias naturales, pero animado siempre por su entusiasmo por la música, la poesía y el arte. El 26 de septiembre de 1838 emprendió el viaje hacia Berlín, acompañado de sus libros y su piano.

EL CÍRCULO DE MÜLLER

En octubre de 1838 Helmholtz inició sus estudios de medicina en el *Pépinière*. El centro estaba situado entre el hospital de la Charité y la Universidad Humboldt. Las clases teóricas se impartían en el instituto, y las prácticas, en el hospital, y estaban a cargo del personal docente del Departamento de Medicina de la universidad. El *Pépinière* proporcionaba las mismas competencias que la Facultad de Medicina y, tras cuatro años de carrera, sus alumnos obtenían el título de doctor en medicina. Sin embargo, la rigidez de su programa era más propia de una escuela técnica que de una universidad, y sus estudiantes eran sometidos a una dura disciplina de trabajo y estudio. Helmholtz residió en su internado entre 1838 y 1842.

Como las clases del primer curso ocupaban 48 horas a la semana, Hermann tuvo que dedicarles grandes energías, a pesar de sus frecuentes migrañas. En este primer curso las asignaturas propias de la medicina se centraban en el estudio de la anatomía humana, las vísceras, los huesos y los órganos sensoriales. Las clases prácticas se impartían en salas de disección. Helmholtz también estudió entonces matemáticas, química, física, lógica, historia, latín y francés. En su tiempo libre practicaba al piano una hora diaria, ejecutando sonatas de Mozart y Beethoven, y con su compañero de habitación tocaban de oído la música popular del momento. Tras las veladas que pasaba en el teatro o en la ópera, se sumergía en la lectura de las obras de Homero, Kant, Goethe o Byron. También tomaba lecciones de esgrima y natación. Asimismo seguía con gran interés los acontecimientos políticos, marcados por la subida al trono del rey Federico Guillermo IV en 1840 y el desarrollo del nacionalismo prusiano.

En el verano de 1841 Hermann permaneció varios meses postrado en cama a causa de un severo ataque de fiebre tifoidea. Tras su recuperación, se embarcó de lleno en su tesis doctoral. Había entrado en contacto con su profesor de Fisiología, el célebre Johannes Müller, quien le sugirió su tema de investigación. Müller ejercía una gran influencia sobre sus estudiantes debido a sus innovadores puntos de vista. En la primera mitad del siglo XIX todavía imperaba la filosofía natural y su visión metafísica del mundo; Müller luchaba contra estas ideas en favor del fundamento empírico de los conceptos científicos, inclusive en medicina.

«El contacto intelectual con personas de elevado nivel científico es la experiencia más interesante que la vida puede ofrecer.»

— HERMANN VON HELMHOLTZ.

Müller, que había percibido la inteligencia de Helmholtz, le invitó a visitar su laboratorio. Allí se formaban científicos que constituirían uno de los grupos de fisiólogos más destacados del siglo. Helmholtz conoció a Ernst Wilhelm von Brücke (1819-1892) y Emil du Bois-Reymond (1818-1896), que eran poco mayores que él. Brücke llegó a ser profesor en Viena, donde su estudiante más ilustre sería Sigmund Freud (entre 1876 y 1882), mientras que Du Bois-Reymond sería conocido por sus trabajos sobre las corrientes eléctricas en los nervios. Fue así como Helmholtz entró en el círculo de los pupilos de Müller y entabló una amistad con Brücke y Du Bois-Reymond que duró toda su vida. El intercambio de ideas entre ellos y con su profesor era diario.

Los pupilos de Müller estaban unidos en la empresa común de conectar la fisiología con la física y de presentar sus conclusiones en términos cuantitativos. Helmholtz tenía ventaja sobre los demás, pues sus conocimientos de matemáticas y física le permitían formular fácilmente los problemas y determinar los métodos apropiados para su solución.

El tema de su tesis doctoral fue el estudio anatómico de las células nerviosas de los invertebrados que Müller tenía en su

JOHANNES PETER MÜLLER (1801-1858)



Müller fue un fisiólogo alemán pionero de la medicina moderna. Nació en Coblenza y estudió medicina en Bonn. Su tesis doctoral, realizada en 1822, versaba sobre la respiración del feto. En 1824 presentó su tesis de habilitación, en la que desechaba las ideas de la filosofía natural y defendía que la relación del científico con la naturaleza debía estar basada en la observación y la experimentación. En 1826 fue nombrado profesor de Medicina en la Universidad de Bonn; allí publicó un tratado sobre la fisiología de la visión. En su libro *Los fenómenos fantásticos de la visión* analizó las experiencias visuales en los sueños y las alucinaciones, así como las visiones en la oscuridad que tanto intrigaron a Goethe. En 1833 ocupó la cátedra de Fisiología en la Universidad Humboldt de Berlín, y en 1840 publicó *el Tratado de fisiología humana,* el cual puso de manifiesto el rigor de sus investigaciones y fue durante años el texto de referencia en esta disciplina. Desde 1830 su laboratorio estuvo en la primera línea de las investigaciones sobre el funcionamiento del cuerpo humano. Müller llevó a cabo los primeros estudios sobre la acción nerviosa: demostró que los nervios sensitivos siempre producían el mismo estímulo, independientemente de su naturaleza. Así, el nervio óptico siempre registraba una sensación luminosa, tanto si era estimulado por la propia luz como si lo era por la presión mecánica sobre el ojo. Viajero incansable, fue rescatado de un naufragio, experiencia que lo dejó traumatizado. Su muerte se debió posiblemente a una sobredosis de morfina con la que trataba su insomnio.

colección. Helmholtz demostró que las fibras nerviosas visibles en el microscopio se originaban en las células ganglionares, o neuronas, observadas en 1836 por el fisiólogo Christian Gottfried Ehrenberg (1795-1876). La tesis doctoral de Helmholtz, defendida el 2 de noviembre de 1842, concluía que dichas neuronas eran de primordial importancia para el desarrollo del sistema nervioso del animal.

LA FUERZA VITAL

Tras su doctorado, realizado a los veintiún años, la formación de Helmholtz continuó durante otro año como médico interno en el hospital de la Charité. Al mismo tiempo, estudiaba física y matemáticas por su cuenta y trabajaba en un nuevo proyecto en el laboratorio de Müller: las investigaciones en torno a la naturaleza de la *fuerza vital*. Este fue el origen de los estudios que le permitieron extender el principio de la conservación de la energía a los sistemas biológicos.

A inicios del siglo XIX la filosofía natural imperaba en las ciencias de la vida. La vida era un conjunto de misterios que no se podían explicar con las leyes físicas y químicas del momento. Uno de los enigmas era el fenómeno de la putrefacción, la descomposición espontánea que experimentaba la materia viva tras la muerte. Otra incógnita era por qué los tejidos orgánicos podían descomponerse en compuestos inorgánicos mediante agentes químicos (ácidos) o físicos (aplicando calor), pero el proceso inverso era imposible. Tampoco se conocía cómo se producía la regeneración del tejido dañado, incluso tras mutilaciones, en algunos seres vivos.

Ante estos fenómenos inexplicables, en el siglo XVIII surgieron teorías vitalistas que invocaban una «fuerza vital» que controlaba los organismos vivos. La teoría de la mónada dominante, una «fuerza» intrínseca a la materia viva, fue propuesta en 1714 por Gottfried Leibniz (1646-1716). Georg Ernst Stahl (1659-1734), médico de Federico Guillermo de Prusia, definió la fuerza vital como un «alma pensante» que estaba alojada en el cerebro y que actuaba a través de los nervios para mantener y reparar el cuerpo y evitar su corrupción. Según el filósofo Immanuel Kant (1724-1804), los seres vivos no eran simples máquinas, pues estaban autoorganizados y poseían una fuerza creadora.

Sin embargo, también había interpretaciones no metafísicas. El fisiólogo francés Xavier Bichat (1771-1802) definió la vida como el conjunto de funciones que resisten a la muerte, pero cuya naturaleza era desconocida por la física. Su colega Claude Bernard (1813-1878) afirmaba: «Lo que es característico de la vida y no pertenece al dominio de la química o de la física es la fuerza que

guía la evolución vital del pollo dentro del huevo». Tendrían que transcurrir años hasta que esa «fuerza guiadora» recibiera una explicación fisicoquímica con el descubrimiento del código genético.

Cuando Helmholtz abordó el problema, las teorías vitalistas persistían, aunque había indicios del avance científico que llevaría al fin del vitalismo. Así, por ejemplo, según ciertas teorías vitalistas solo el riñón vivo podía producir la urea, pero en 1828 el químico alemán Friedrich Wöhler (1800-1882) sintetizó urea en su laboratorio de Berlín sin necesidad de un riñón.

El propósito de Helmholtz era estudiar sistemáticamente los procesos de descomposición espontánea de la putrefacción y la fermentación. Según la teoría de la fuerza vital, la putrefacción del cuerpo tras la muerte estaba producida por las fuerzas físicas y químicas del organismo, que la fuerza vital controlaba durante la vida. Esto equivalía a afirmar que la materia viva tenía las cualidades de un móvil perpetuo, ya que seguía funcionando, sin control, hasta que se descomponía. Además, la fuerza vital desaparecía y no se convertía en ninguna forma de energía detectable.

La fermentación era un proceso similar a la putrefacción. La acción de la levadura hacía que se hinchara el pan y que los zumos de frutas y el grano se transformasen en alcohol. Helmholtz quiso comprobar algunas de sus ideas experimentalmente. Se sabía que la levadura contenía microorganismos. Envolvió pedazos de carne en vejigas sellando los orificios para prevenir el paso de los microorganismos, pero posibilitando el paso de agentes químicos líquidos y gaseosos. A continuación, introdujo las vejigas en un líquido en putrefacción o fermentación en presencia de levadura y observó que la putrefacción de la carne era lenta e incompleta.

Los resultados de Helmholtz, sin embargo, no fueron concluyentes en contra del vitalismo. En los años siguientes, el estudio de la fermentación llevaría a Louis Pasteur (1822-1895) a descubrir en 1857 que hay diferentes variedades de levadura que producen diferentes tipos de fermentación, pudiendo endulzar o agriar el vino. En 1897 el químico alemán Eduard Buchner (1860-1917) descubrió que las células de la levadura contienen catalizadores orgánicos, o enzimas, que aceleran la fermentación.

El primer trabajo de Helmholtz, «Sobre la naturaleza de la putrefacción y la fermentación», se publicó en 1843. Con él aprendió nuevas técnicas químicas, comprobó que era posible realizar experimentos en fisiología usando el método científico de la física y adquirió nuevas ideas para profundizar sobre el problema del vitalismo.

EL METABOLISMO DE LA ACTIVIDAD MUSCULAR

En 1843 Helmholtz inició su largo servicio militar en la guarnición de los Húsares Reales de Potsdam. Comenzó como cirujano ayudante, preparándose para el examen estatal que lo cualificaría definitivamente para ejercer la medicina. La ruda vida militar era muy distinta de la atmósfera científica que vivió durante sus años universitarios. Se tocaba diana a las cinco de la mañana, vivía en un barracón y debía atender sus tareas como oficial médico. Sin embargo, pudo montar un laboratorio en uno de los barracones, donde a menudo recibía la visita de sus amigos Du Bois-Reymond y Brücke.

Helmholtz ya estaba concentrado entonces en la obtención de la evidencia experimental que iba a establecer su principio de conservación de la energía. Pretendía confirmar si la fuerza mecánica y el calor producido por los organismos biológicos eran debidos exclusivamente a su metabolismo. Así, ideó en su laboratorio el experimento más simple posible que le permitiera aislar un músculo animal todavía vivo que fuera capaz de contraerse al ser excitado por una corriente eléctrica. La energía empleada en la contracción del músculo tenía que provenir del tejido muscular y no de una hipotética fuerza vital. Su objetivo era validar esta hipótesis con mediciones precisas de las modificaciones en la composición química del músculo causadas por su contracción. Helmholtz esperaba comprobar experimentalmente que la materia orgánica se consumía al producirse trabajo mecánico. Esto ya se sospechaba, debido a la sensación de fatiga tras el trabajo muscular y la posterior recuperación, pero existía una total ignorancia acerca de la naturaleza, la cantidad y la localización de la materia consumida.

Helmholtz postulaba que la fibra de los propios músculos se consumía y decidió investigarlo. Con este propósito, construyó un generador electrostático para cargar una botella de Leyden, un dispositivo condensador que almacenaba la carga eléctrica. Diseccionó cuidadosamente los músculos de las ancas de una rana y estimuló eléctricamente uno de ellos repetidas veces (las descargas eléctricas se producían al conectar el músculo con los electrodos de la botella de Leyden), haciéndolo contraerse hasta que el músculo quedaba exhausto por el cansancio y dejaba de responder a los estímulos.

El objetivo era comparar su composición química con la del músculo no estimulado. Y ahí estribaba la principal dificultad: cómo identificar los cambios químicos del músculo. La incertidumbre de los análisis químicos cuantitativos era alta debido a las técnicas rudimentarias de la época. No obstante, Helmholtz fue capaz de encontrar diferencias significativas entre los músculos estimulados y los que habían permanecido en reposo. Tuvo que aprender los métodos químicos para extraer e identificar sustancias químicas de la materia viva. Entre los constituyentes del músculo, investigó las albúminas, que eran liberadas al sumergir en agua destilada los extractos de músculo. Las albúminas eran sustancias que se coagulaban al ser calentadas, como la clara del huevo. En 1839, el químico holandés Gerardus Johannes Mulder (1802-1880) obtuvo su fórmula química y las denominó «proteínas». Las proteínas contenían nitrógeno, azufre y fósforo, y eran primordiales para la vida. Helmholtz conocía que la cantidad de fosfatos y sulfatos de la orina se incrementaba después de la actividad muscular, lo que tenía que ser debido a la descomposición de las proteínas.

Helmholtz separaba cuidadosamente las albúminas de la disolución y luego analizaba el residuo usando distintos disolventes. Tras secar y pesar los distintos extractos, obtenía tres datos experimentales —correspondientes a la cantidad de extracto— que denominaba «acuoso», «alcohólico» y «espirituoso». Pero estas cantidades cambiaban bastante al repetir el experimento, debido a diversos factores: el número e intensidad de las descargas eléctricas, la composición inicial del músculo, un error en el método de análisis químico, etc. Para obtener datos significativos calculó

los cocientes entre los extractos del músculo electrificado y en reposo. Al repetir el experimento encontró por fin resultados estables para los cocientes.

Helmholtz concluyó que «en todos los experimentos, sin excepción, el extracto acuoso disminuye en el músculo electrificado y, a la inversa, los extractos espirituosos y alcohólicos aumentan en comparación con el músculo no electrificado». Había demostrado cuantitativamente que durante la acción de los músculos tienen lugar en ellos transformaciones químicas, lo que publicó en el artículo «Sobre la consumición de la materia durante la acción muscular» en la revista *Müller's Archiv*, editada por Müller. La importancia de este análisis radicaba en que había descubierto que era posible investigar los fenómenos fisiológicos de forma cuantitativa con un rigor sin precedentes. Además, comenzó a incluir en sus estudios una discusión de los errores experimentales. Al adoptar las formas de experimentación más propias de la física, la fisiología dejaba de ser una ciencia pasiva basada en la mera observación.

Sin embargo, los métodos basados en análisis químicos eran imprecisos. Para establecer pruebas que confirmaran la ley de conservación de la energía, era necesario cuantificar la relación entre la acción muscular y el calor desarrollado en los músculos. Así que Helmholtz empezó a trabajar en una serie de experimentos; allí donde fracasó la química, la física le permitiría triunfar.

EL CALOR EN LA CONTRACCIÓN MUSCULAR

El 29 de septiembre de 1845 Helmholtz partió hacia Berlín con un permiso de seis meses para realizar los exámenes de capacitación en medicina y cirugía. Durante su estancia estuvo adscrito como cirujano en el Instituto Friedrich-Wilhelm. Al término de ese período, estaba obligado a servir como cirujano en el ejército prusiano durante seis años más. Los resultados del examen de capacitación se conocieron en enero de 1846: Helmholtz ya era oficialmente médico cirujano con licencia para ejercer. El 7 de febrero se reincorporó a su puesto en el destacamento de Potsdam.

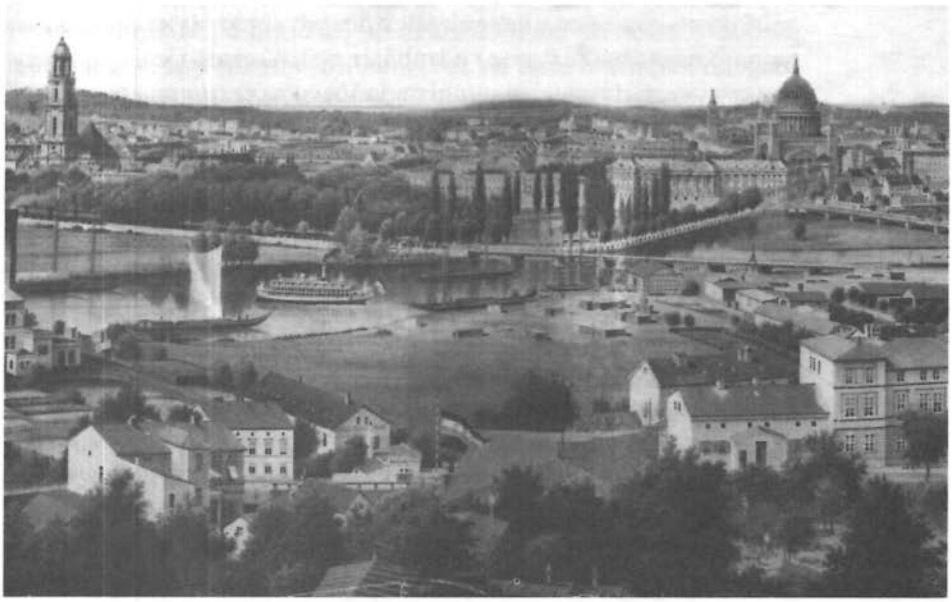




FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
Helmholtz a los veintiséis años, poco después de enunciar el principio de conservación de la energía.

FOTO SUPERIOR DERECHA:
Carl Ludwig en una litografía realizada en 1859. Él y Helmholtz se conocieron en Berlín y ambos defendieron la doctrina mecanicista frente a las teorías vitalistas.

FOTO INFERIOR:
Potsdam, localidad donde nació Helmholtz, en una litografía realizada en 1871. Inicialmente, el científico también desarrolló aquí su carrera como médico.



Durante el tiempo que pasó en Berlín, pudo continuar sus investigaciones en el laboratorio de su antiguo profesor de Física en la universidad, Heinrich Gustav Magnus (1802-1870). También asistió a las reuniones científicas de la Sociedad de Física de Berlín. Esta institución había sido fundada ese mismo año por alumnos de Magnus y pupilos de Müller, como Du Bois-Reymond, Brücke y Carl Ludwig. Dos años después la Sociedad editó el primer número de su revista científica, *Fortschritte der Physik*, donde Helmholtz publicó su primer *report* (artículo de revisión científica) titulado «Sobre la teoría del calor animal», que estaba basado en un trabajo que había realizado para una enciclopedia de medicina durante su estancia en Berlín en otoño de 1845.

Se trataba de un artículo crítico sobre el origen físico del calor animal. En aquellos momentos se había extendido la teoría que afirmaba que el calor provenía de la combustión del carbono y el hidrógeno de los nutrientes en la sangre al aspirar oxígeno. Helmholtz estaba convencido de que esa teoría era errónea. Por un lado había analizado los únicos datos experimentales obtenidos por Pierre Dulong (1785-1838) y César Despretz (1791-1863) en París en la década de 1820. El análisis demostró que los calores de combustión de las moléculas de carbono e hidrógeno con el oxígeno inspirado eran un 10% menores que los que se liberaban de las mismas cantidades de carbono e hidrógeno contenidos en las moléculas orgánicas de los nutrientes.

Helmholtz determinó que las posibles fuentes de error en los experimentos de Dulong y Despretz se debían a las hipótesis simplificadoras que igualaban el calor de combustión al calor liberado por los procesos químicos en el organismo animal. Los procesos eran tan complejos que un error del 10% era tolerable. Helmholtz concluyó que estos experimentos no eran adecuados para determinar si existía un acuerdo preciso entre el calor desarrollado químicamente y el calor medido en el organismo. Había que conformarse con concluir que los procesos químicos en el organismo producían aproximadamente tanto calor como el que era liberado.

Helmholtz aprendió entonces una lección que marcó la dirección de sus propias investigaciones. Cuando se estudia un problema complejo aplicando muchas aproximaciones simplificado-

ras, podemos darnos por satisfechos con respuestas aproximadas al medir el proceso total. La opción alternativa es aislar un factor individual del problema y así conseguir una medida precisa de un proceso más simple.

Se conocía que la acción muscular liberaba calor. No podía descartarse que dicho calor derivara de otros procesos, como un aumento del flujo arterial en el músculo. Pero, basándose en su estudio sobre el metabolismo en la contracción muscular, Helmholtz sabía que este se producía en el propio tejido muscular. Por tanto, el calor producido al contraer un músculo debía provenir también de la combustión de sus propios elementos. Para demostrarlo, se dispuso a experimentar de nuevo bajo las condiciones ideales que proporcionaba un músculo de rana aislado, lo que le permitiría controlar las variables experimentales y descartar cualquier influencia del resto del cuerpo, incluida la transmisión de calor por la sangre. Procedió como antes, contrayendo un músculo con descargas eléctricas, pero esta vez medía su temperatura y la comparaba con la del otro músculo en reposo.

Helmholtz utilizó un aparato estimulador eléctrico con una bobina de inducción que le permitía producir una contracción constante y prolongada del músculo gracias a una serie de rápidos e intensos impulsos eléctricos. Diseñó un sofisticado termómetro consistente en un circuito termoeléctrico con tres termopares conectados en serie. Con su aparato termoeléctrico podía llegar a detectar variaciones de temperatura de una milésima de grado. Para comparar el estado del músculo en contracción con el otro músculo similar en reposo, insertaba los tres termopares atravesando los dos músculos, de manera que cada músculo cubría uno de los dos extremos de cada termopar. Conectaba los circuitos y esperaba a que la temperatura de los dos músculos se igualara. Entonces estimulaba uno de los músculos durante dos o tres minutos.

Los resultados del experimento eran concluyentes. La temperatura del músculo contraído era entre 0,14 y 0,18 grados superior a la del músculo de control. Esto solo podía explicarse por la combustión de sustancias en el músculo mismo. Para descartar la posibilidad de que la corriente eléctrica hubiera causado el calentamiento, estimulaba el músculo después de perder su irritabili-

dad, sin observar el más ligero aumento de temperatura. Con este experimento consiguió suficientes evidencias de que las reacciones químicas intramusculares proporcionaban energía mecánica y calor, lo que ya constituía una sólida base para su artículo sobre la conservación de la energía. Con respecto al vitalismo, Helmholtz consideraba que había demostrado claramente que no había necesidad de postular la intervención de fuerzas metafísicas en un mundo animado cuyos procesos podían ser explicados mediante la física y la química.

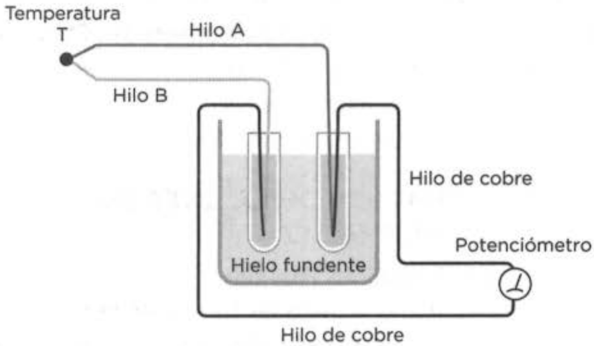
El artículo de Helmholtz «Sobre la producción de calor en la acción muscular», publicado en noviembre de 1847, se convirtió en un clásico de la fisiología del siglo XIX, no solo por la importancia de sus resultados, sino por la novedosa metodología experimental utilizada y el rigor en el tratamiento de los datos experimentales. Helmholtz dedicaba gran parte de su artículo a la descripción detallada de los aspectos técnicos y metodológicos de su investigación, en la cual había utilizado los aparatos de laboratorio más avanzados de su tiempo.

LA CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA ANTES DE HELMHOLTZ

El descubrimiento del principio de conservación de la energía fue uno de los grandes logros de la física del siglo XIX. Desde su formulación en la década de 1840, esta ley ha demostrado su supremacía como principio fundamental en todas las ramas de la física. En realidad, se trató de dos descubrimientos simultáneos. En primer lugar, el descubrimiento del concepto de *energía* como una propiedad fundamental de los sistemas físicos. En segundo lugar, su *conservación*; es decir, que «la energía de un sistema aislado es constante». La conservación de la energía fue un caso único entre los avances del siglo XIX, ya que no se trataba de un descubrimiento concreto acerca de las propiedades de la materia o de sus interacciones, basadas en hipótesis acerca de átomos y moléculas, o en la existencia del éter, que con el tiempo han sido rebasadas por teo-

EL TERMOPAR Y EL EFECTO SEEBECK

Helmholtz utilizó termopares para medir la temperatura en sus experimentos sobre la formación de calor en la contracción muscular. Un termopar (véase la figura) es un dispositivo formado por dos metales distintos (hilos A y B) unidos en un extremo, que se introduce en el material cuya temperatura (T) se desea medir; los otros extremos de los hilos A y B se mantienen a una temperatura constante de referencia, por ejemplo, sumergiéndolos en hielo fundente, a cero grados. Los extremos de referencia se conectan a sendos hilos de cobre que van a un potenciómetro donde se registra un voltaje neto, denominado fuerza electromotriz térmica. El voltaje producido depende de la temperatura. Para un intervalo limitado de temperaturas, esta dependencia puede representarse mediante un polinomio: $V = a + bT + cT^2$. Los tres coeficientes a, b y c deben determinarse mediante un calibrado, es decir, midiendo la fuerza electromotriz para varias temperaturas conocidas. Debido a su pequeña masa, el termopar alcanza muy rápidamente el equilibrio térmico con el material cuya temperatura se quiere medir.



El funcionamiento del termopar se basa en el denominado efecto Seebeck, descubierto en 1821 en Berlín por Thomas Johann Seebeck (1770-1831). Este investigador comprobó que si construía un circuito parcialmente de cobre y parcialmente de bismuto y calentaba una de las uniones entre ambos metales, se registraba una corriente eléctrica que era capaz de mover una aguja magnetizada próxima al circuito. Los metales conductores contienen electrones que se mueven al aplicar un voltaje, generando la corriente eléctrica. La densidad de electrones difiere de un metal a otro. Cuando se sueldan dos metales diferentes para formar dos uniones y ambas se mantienen a temperaturas diferentes, la difusión de los electrones tiene lugar en las uniones a diferentes velocidades. Hay un movimiento neto de electrones que produce la fuerza electromotriz de Seebeck.

rías más modernas, sino que es un principio «universal», que tiene validez independientemente de los sistemas físicos, cuyo comportamiento es utilizado para interpretar dichos sistemas. Sigue siendo válida en la física actual, lo que confirma su universalidad.

LA VIS VIVA

Las primeras consideraciones rigurosas sobre la energía y su conservación surgieron a partir de la publicación de los *Principia* de Isaac Newton (1643-1727). Entonces se hablaba de «fuerza viva» y «fuerza inerte». El teorema de las fuerzas vivas de la mecánica ha conservado esta nomenclatura. La *vis viva* (*vis* en latín significa «fuerza») correspondía a la energía debida al movimiento y se expresaba como el producto de la masa por la velocidad al cuadrado: mv^2. La fuerza inerte correspondía a energía estática, lo que hoy se denomina «energía potencial». Thomas Young (1773-1829) fue el primero que usó el término *energía* para referirse a la vis viva. En 1829 Gaspard Coriolis (1792-1843) introdujo un factor 1/2, definiendo la energía cinética tal y como se la conoce hoy:

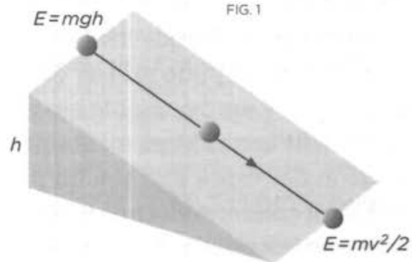
$$T = \frac{1}{2}mv^2.$$

En 1669 Christiaan Huygens (1629-1695) había descrito las colisiones elásticas e inelásticas y notó la importancia de la vis viva en los choques. Tanto Leibniz como los hermanos Bernoulli comprobaron la conservación de la vis viva en las colisiones entre cuerpos duros (colisiones elásticas) y encontraron que en las colisiones inelásticas se producía una pérdida de vis viva. Por otro lado, ya estaba establecido que la *vis motiva* (o fuerza de movimiento) se conservaba en los choques. Es lo que en la actualidad se denomina *cantidad de movimiento*, definida como el producto de la masa por la velocidad: $p = mv$. Tras la introducción de la energía potencial, V, por Pierre Simon Laplace (1749-1827), se estableció la conservación de la energía mecánica, es decir, la suma de la energía cinética más la potencial: $E = T + V$.

CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA MECÁNICA

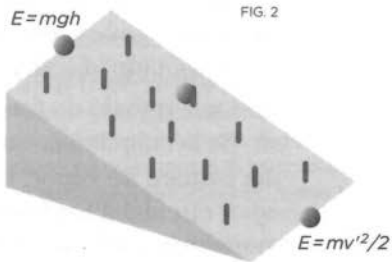
La conservación de la energía mecánica se ilustra en el experimento de la figura 1. Una bola cae desde una altura h por un plano inclinado sin rozamiento. La bola, inicialmente en reposo, tiene solo energía potencial. Cuando llega abajo conserva la misma energía en forma de energía cinética —lo que se puede comprobar midiendo la velocidad final—, aunque, en la práctica, la energía mecánica no se conserva inalterada puesto que siempre hay pérdidas por fricción, rozamiento del aire, etc. La fricción consiste en choques entre las moléculas de dos cuerpos a nivel microscópico cuando estos se ponen en contacto debido a irregularidades en las superficies de unión, que no son totalmente lisas. En la figura 2 se repite el experimento, pero se simula el rozamiento colocando obstáculos en el plano inclinado, de modo que la bola tenga que chocar varias veces antes de llegar abajo. Ahora la velocidad final v' es menor que la del caso anterior, por lo que no se conserva la energía mecánica. En cada choque la bola pierde algo de energía cinética e incluso puede detenerse si choca frontalmente. La energía que falta se transforma en cada choque en otros tipos de energía, como energía de deformación elástica, ondas de sonido o calor.

FIG. 1



Conservación de la energía mecánica.

FIG. 2



No conservación de la energía mecánica.

En la formulación de la mecánica por Joseph Louis Lagrange (1736-1813), esta conservación de la energía mecánica se obtenía como la primera consecuencia de las ecuaciones del movimiento. La mecánica lagrangiana —desarrollada en 1788 como una reformulación de la mecánica clásica— prescindía del concepto de fuerza de la mecánica newtoniana y se basaba en el *lagrangiano*, $L = T - V$, cantidad íntimamente relacionada con la energía, para generar las ecuaciones del movimiento.

Más problemática era la conversión entre trabajo y calor. El concepto físico de *trabajo* o *energía mecánica* comenzó a utilizarse alrededor de 1780. En la década de 1820 ya existía una definición precisa del trabajo realizado por una fuerza sobre un cuerpo que se desplazaba cierta distancia. Podía calcularse como el producto escalar de la fuerza por el desplazamiento: $dW = \vec{F} \cdot d\vec{r}$. Por otra parte, la noción de *calor* como un fluido invisible de composición desconocida que penetra en los cuerpos aumentando su temperatura se remonta al médico escocés James Black (1728-1799). Black definió cuantitativamente el calor e introdujo las nociones de *capacidad calorífica*, como la cantidad de calor necesario para elevar un grado la temperatura de una cantidad fija de una sustancia, y de *calor latente*, como el calor necesario para convertir el hielo en agua o el agua hirviendo en vapor.

Con el invento de la máquina de vapor por Thomas Savery (1650-1715) y las mejoras realizadas en la década de 1760 por el mecánico escocés James Watt (1736-1819), que inventó la cámara condensadora separada de la caldera, se pudo utilizar el calor para producir trabajo de forma eficiente y aprovechable sin precedentes. En la máquina de vapor de Watt una caldera mantenía caliente una cámara de vapor; la presión del vapor elevaba un pistón y el vapor circulaba hasta una cámara condensadora mantenida a baja temperatura. Finalmente, el pistón se unía a un cigüeñal que hacía girar una rueda.

Sin embargo, poco se conocía sobre la naturaleza del calor. El padre de la química moderna, el francés Antoine Lavoisier (1743-1794), desarrolló a finales del siglo XVIII su teoría del «calórico», un fluido invisible y ligero que fluía de los cuerpos calientes a los fríos, generando una fuerza, la cual era la que hacía funcionar la máquina de vapor. Esta teoría supuso el punto de partida para entender el calor como una fuerza, o como una energía.

En los últimos años del siglo XVIII, las observaciones de Benjamin Thompson, conde de Rumford, y el químico Humphry Davy (1778-1829) de que el trabajo mecánico podía convertirse en calor mediante fricción, fueron clave para las subsiguientes teorías di-

BENJAMIN THOMPSON, CONDE DE RUMFORD (1753-1814)



El conde de Rumford fue un aventurero, científico e inventor americano-británico, nacido en Massachussets. De niño asistió al Harvard College, donde se interesó por la ciencia. A los diecinueve años se casó con una rica viuda y alcanzó una elevada posición social en Nueva Inglaterra. Cuando estalló la Guerra de Independencia, su casa fue atacada y se refugió tras las líneas británicas, abandonando a su mujer. Tras la guerra se marchó a Londres, donde ya gozaba de una reputación científica gracias a sus experimentos sobre explosivos y armas de fuego. Soldado de fortuna, espía, hombre de Estado y cortejador de viudas acaudaladas, llevó una vida extravagante por toda Europa. Llegó a ser ministro de la Guerra en Baviera y recibió el título de conde del Sacro Imperio Romano por la reorganización del ejército alemán. En 1804 se casó con Anne Marie Lavoisier, también química y viuda del químico francés Antoine Lavoisier, que había sido ejecutado en 1794 durante la Revolución francesa y cuya teoría del fluido calórico había sido refutada por Thompson. Tras proclamar que el calor no es una sustancia, sino que proviene del movimiento generado por fricción, Thompson se comparó a sí mismo con Newton, afirmando que sus leyes del calor eran tan importantes como las de la gravedad.

námicas del calor. En 1798 el conde de Rumford era ministro de la Guerra en Baviera; también era un científico aficionado y estaba interesado por la naturaleza del calor. La teoría del calórico no le convencía. Según esta, el calórico era un tipo de sustancia similar a los elementos químicos y se producía en reacciones químicas como la combustión; unido al hielo, podía producir agua como en una reacción química (hielo + calor = agua).

El conde de Rumford dudaba de este planteamiento, porque el calor también se producía por medios mecánicos, mediante la fricción, sin una reacción química. Inspeccionando la perforación

CARNOT Y LA CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA



El ingeniero militar francés Sadi Carnot (1796-1832) fue uno de los fundadores de la termodinámica. En su artículo «Sobre el poder de movimiento del calor» (1824) comparaba el calor con un fluido y la máquina de vapor con una rueda hidráulica. En una máquina de vapor fluye calor de la caldera al refrigerador, donde el vapor se condensa. La rueda hidráulica se mueve debido al flujo de agua que cae de una cierta altura y el trabajo suministrado por el agua es proporcional a la altura de la caída. Concluyó que el trabajo producido por la máquina de vapor debía ser proporcional a la diferencia de temperatura entre la caldera y el condensador debido a la «caída» del fluido calórico. Era necesaria una diferencia de temperatura para que una máquina realizara trabajo. Carnot pensaba erróneamente que el calor se conservaba y que la máquina más eficiente funcionaría como un ciclo ideal de expansiones y compresiones en el que el motor funcionaría reversiblemente y donde el fluido calórico viajaría hacia delante y hacia atrás entre las dos fuentes de calor sin ninguna pérdida. Ahora sabemos, por el principio de conservación de la energía, que la máquina de vapor transforma en energía mecánica parte del calor que fluye a través de ella y que el calor que llega al condensador es menor que el que entró en la máquina. Tras enfermar de escarlatina y fiebre cerebral, Sadi Carnot murió de cólera en un manicomio a la edad de 36 años. Pero en 1878 su hermano publicó un artículo póstumo, escrito por Carnot antes de morir, en el que enunciaba claramente la conservación de la energía: «El calor es simplemente potencia motriz o movimiento que ha cambiado de forma. Es un movimiento entre las partículas de los cuerpos. Cuando hay destrucción de potencia motriz hay al mismo tiempo producción de calor en una cantidad exactamente proporcional a la cantidad de potencia motriz destruida. Recíprocamente, siempre que hay destrucción de calor se produce potencia motriz. Podemos establecer la proposición general de que la cantidad de potencia motriz es invariable en la naturaleza; esto es, ni se crea ni se destruye. Es cierto que cambia de forma (a veces produce una forma de movimiento y a veces otra), pero nunca se aniquila». Desgraciadamente este artículo no tuvo gran influencia en los acontecimientos que siguieron.

de los cañones en la fábrica de armamento de Múnich observó que el bronce de un cañón se calentaba tanto por el rozamiento con la barrena que en poco más de dos horas hacía hervir el agua de una tinaja donde caían sus virutas. La aparentemente inagotable cantidad de calor generada en el proceso no podía provenir ni del metal ni del agua, sino de la fricción del cañón con la barrena. En 1799 publicó un artículo en la revista científica de la Royal Society de Londres con sus descubrimientos. En su opinión, el calor no era una sustancia material, sino simplemente movimiento, es decir, aquello que estaba siendo suministrado por la barrena perforadora. El mismo año Davy llegó a la idéntica conclusión con un experimento en el que, frotando mecánicamente dos trozos de hielo, conseguía fundir rápidamente las superficies en contacto.

A principios del siglo XIX las evidencias científicas ya apuntaban hacia la conservación de la energía. Por un lado, se conocían los experimentos de Thompson y Davy y la tecnología de la máquina de vapor; por otro, la conservación de la energía mecánica. La conversión de energía mecánica en calor y la conversión de calor en energía mecánica estaban demostradas. Pero conversión no significaba necesariamente conservación. La observación del conde de Rumford de que el calor por fricción era inagotable contradecía todo principio de conservación. La confusión se incrementó cuando, en 1824, Sadi Carnot publicó un artículo proporcionando un firme fundamento teórico al funcionamiento de las máquinas de vapor que todavía estaba basado en el fluido calórico.

LOS PRECURSORES DE LA CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA

Alrededor de 1840 un grupo de científicos llegaron independientemente a una conclusión similar acerca de la conservación de la energía; entre otros, cabe citar a Friedrich Mohr (1837), Michael Faraday (1840), William Grove (1842), Marc Seguin (1839) y Ludwig Colding (1840). Pero ninguno de ellos proclamó un enunciado concluyente. Finalmente, Mayer, Joule y Helmholtz enunciaron independientemente el principio de conservación en forma precisa, basándose en sus propias observaciones y experimentos.

Tradicionalmente, se consideran los «padres» del principio de conservación de la energía.

«Movimiento y calor son solo diferentes manifestaciones de una única fuerza y, consecuentemente, el movimiento o trabajo mecánico y el calor, que se han considerado hasta ahora cosas completamente distintas, deben ser también capaces de transformarse el uno en el otro.»

— Julius von Mayer.

En 1840 el médico alemán Julius von Mayer, que en aquellos momentos trabajaba para la Compañía Alemana de las Indias Orientales, embarcó hacia los trópicos a bordo del buque *Java* en Róterdam. Como médico de a bordo, notó que la sangre venosa de los marineros tenía un color inusual. Era excesivamente roja; parecía más sangre arterial que venosa. Esto implicaba que el calor de los trópicos tenía alguna relación con la oxigenación de la sangre. Mayer concluyó que en los trópicos el organismo necesita realizar menos esfuerzo para mantener su calor corporal y, como resultado, se produce menos oxidación en la sangre. A raíz de estas observaciones Mayer se interesó por los fenómenos del calor y su conversión en trabajo. Esto le inspiró a escribir el artículo «Observaciones sobre las fuerzas de la naturaleza inanimada». Allí presentaba su teoría sobre la equivalencia entre calor y trabajo:

> Podemos entender la conexión entre fuerza de caída, movimiento y calor de la siguiente forma. Sabemos que aparece calor cuando las partículas individuales de un cuerpo se aproximan; la compresión produce calor. Ahora bien, lo que ocurre para las pequeñas partículas y los pequeños espacios entre ellas debe aplicarse también a las masas grandes y a los espacios mensurables. La caída de un cuerpo implica una auténtica reducción del volumen de la tierra y debe por tanto estar relacionada con el calor que como consecuencia aparece; este calor debe ser exactamente proporcional a su masa y a la distancia.

JULIUS VON MAYER (1814-1878)



Mayer fue un médico alemán que estableció por primera vez la ley de la conservación de la energía. Sus resultados aparecieron publicados en un artículo en 1842. Varios años después, en 1847, leyó los trabajos de Joule sobre la transformación entre calor y energía mecánica. Mayer era consciente de la importancia de su descubrimiento, pero no fue reconocido por sus contemporáneos, que rechazaron su principio. Este hecho y la muerte de dos de sus hijos en 1850 deterioraron su salud mental hasta el punto de intentar suicidarse. Estuvo un tiempo recluido en una institución mental, durante el cual recuperó su fama como científico y obtuvo el reconocimiento a sus logros. Continuó trabajando como médico hasta su muerte, producida a consecuencia de una tuberculosis.

Mayer fue el primero que encontró una relación cuantitativa entre calor y trabajo, o equivalente mecánico del calor, a partir de datos publicados sobre el calentamiento del aire por compresión. Así, afirmó que «la caída de un peso desde una altura de unos 365 m corresponde al calentamiento del mismo peso de agua de 0 a 1 grado centígrado».

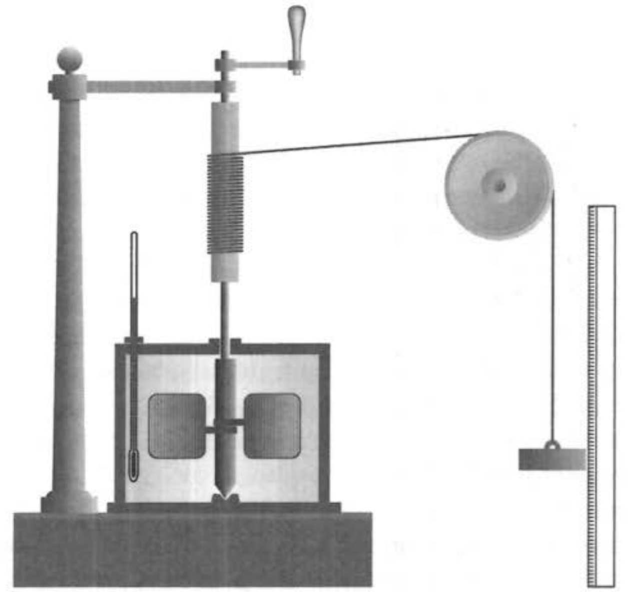
Mayer trató de publicar su artículo en la prestigiosa revista alemana *Annalen der Physik und Chemie*, pero fue rechazado. Se publicó finalmente en 1842 en la revista *Annalen der Chemie und Pharmacie*. Sin embargo, su trabajo tuvo poco impacto, ya que sus teorías estaban expresadas en términos oscuros y especulativos, más propios de la filosofía natural que de la ciencia predominante en aquella época.

A principios de la década de 1840, James Prescott Joule realizó diversos experimentos para cuantificar la relación entre calor y trabajo, los cuales fueron una prueba concluyente de que el calor no era una sustancia, sino una forma de movimiento. Sin

embargo, la Royal Society de Londres rechazó publicar su trabajo en la revista *Philosophical Transactions*. Joule refinó sus técnicas experimentales para medir exactamente el equivalente mecánico del calor, y en 1845 presentó en el congreso anual de la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia los resultados de su célebre experimento con la rueda batidora.

En este experimento, Joule introdujo en un recipiente lleno de agua un eje rotatorio con unas paletas batidoras que hacían girar el líquido; en las paredes del recipiente había insertado unas tablillas que aumentaban la fricción con el agua, produciendo calor que calentaba el agua. Conociendo la masa de agua y midiendo el aumento de temperatura podía determinar la cantidad de calor producido. Este calor se medía en unidades denominadas *calorías* (caloría es la cantidad de calor necesaria para elevar un grado la unidad de masa). El eje con las paletas era movido por un peso suspendido a través de una polea, tal y como puede verse en la figura 1. La distancia recorrida determinaba el trabajo mecánico realizado. En su

FIG. 1



Recreación del aparato utilizado por Joule para medir el equivalente mecánico del calor.

experimento, Joule encontró una proporcionalidad directa entre el calor Q y el trabajo W. La constante de proporcionalidad era el equivalente mecánico del calor, que permitía determinar la cantidad de trabajo necesaria para producir cierta cantidad de calor. Este experimento demostró que era posible relacionar cuantitativamente el calor producido y el trabajo mecánico equivalente.

> «La cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de una libra de agua un grado Fahrenheit requiere comunicarle una cantidad de vis viva igual a la que adquiere un peso de 890 libras que cae desde un pie de altura.»
>
> — James Prescott Joule.

Al igual que en el caso de Mayer, el trabajo de Joule tampoco recibió mucha atención. Sin embargo, Joule presentó una nueva versión de su experimento en un congreso en Oxford que tuvo lugar en junio de 1847. Joule todavía era un desconocido y no fue muy bien tratado por el coordinador de la sesión, que le instó a que resumiera sus resultados en lugar de leer su comunicación completa ante la audiencia. Su teoría habría pasado totalmente desapercibida, de no ser por la atención prestada por el joven William Thomson (1824-1907), el futuro lord Kelvin, que se había licenciado dos años antes en la Universidad de Cambridge con todos los honores y que años más tarde sería el científico más importante de Inglaterra.

El congreso de Oxford de 1847 contribuyó al establecimiento definitivo de la ley de conservación de la energía, impulsada por los trabajos subsiguientes de Thomson en el ámbito de la termodinámica. Pocos años después, en una serie de artículos publicados entre 1851 y 1855, Thomson presentó su teoría dinámica del calor, basada en la conservación de la energía de Joule. Estos artículos constituyeron los inicios de la nueva ciencia de la termodinámica, en la que la conservación de la energía pasó a conocerse como *primer principio de la termodinámica.*

Joule fue encumbrado definitivamente como el «descubridor» de la conservación de la energía en el *Tratado de filosofía natural*

JAMES PRESCOTT JOULE (1818-1889)



Joule era hijo de un fabricante de cerveza de Mánchester, ciudad donde estudió con John Dalton, uno de los padres de la teoría atómica de la química. Joule montó un laboratorio científico en la fábrica de su padre, donde realizó experimentos sobre la eficiencia de la máquina de vapor y los circuitos eléctricos. En 1841 descubrió el denominado *efecto Joule*, es decir, que la pérdida de calor de una corriente eléctrica en una resistencia es igual al producto de la resistencia por la intensidad de corriente elevada al cuadrado. En 1842 presentó un artículo titulado «El origen eléctrico del calor de la combustión» ante la Sociedad Literaria y Filosófica de Mánchester, liderada por Dalton. Años más tarde Joule consiguió medidas muy precisas de la conversión entre calor y distintos tipos de energía: eléctrica, mecánica y química.

de William Thomson y Peter Guthrie Tail, obra de 1867. Este texto contribuyó a difundir una visión parcial del descubrimiento, concediendo todo el crédito a la ciencia británica representada por Joule, e ignorando a los científicos alemanes que tomaron parte en él, es decir, Mayer y, sobre todo, Helmholtz. En honor a Joule, la unidad de energía se denomina «julio».

LA CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA

La teoría de Helmholtz sobre la conservación de la energía supuso la primera contribución a la física teórica del médico alemán. Helmholtz estudió el principio en profundidad, proporcionando la prueba matemática más sólida posible con los conocimientos de la época, y lo aplicó al mayor conjunto posible de fenómenos,

incluidos los pertenecientes al ámbito de la biología. Las contribuciones de Joule y Helmholtz eran independientes y complementarias, y fueron conocidas el mismo año de 1847, con una diferencia de un mes. La simultaneidad de los dos trabajos (empírico por parte de Joule y teórico por parte de Helmholtz) les confirió más importancia, si cabe, de la que tenían por separado.

LA CONSERVACIÓN DE LA FUERZA

Antes de 1860 aún persistía el término «fuerza» entre los físicos alemanes, que pronto fue sustituido por el de «energía», aunque al principio este concepto no tuvo un significado inequívoco. Por eso Helmholtz tituló su famoso artículo «Sobre la conservación de la fuerza». Lo presentó en el congreso de la Sociedad de Física de Berlín el 23 de julio de 1847 y, ante el asombro de todos, Helmholtz se reveló como un experto en física matemática. Los asistentes fueron los primeros en conocer las pruebas teóricas de la conservación de la energía aportadas por él, cuando el principio era prácticamente ignorado en el resto del mundo.

Helmholtz envió el manuscrito a su profesor de Física en la universidad, Heinrich Gustav Magnus, para su publicación en la revista *Annalen der Physik*, editada por J.C. Poggendorff, quien respondió que el tema en cuestión no era lo suficientemente experimental para justificar su publicación, aunque resaltó su importancia teórica. Poggendorff y Magnus recomendaron a Helmholtz que lo publicara independientemente, por lo que envió su ensayo al editor G.A. Reimer de Berlín, que lo publicó aquel mismo año y pagó a Helmholtz unos honorarios, para sorpresa de este.

FUERZA Y MATERIA

En la introducción de su ensayo, Helmholtz presentaba su postura filosófica sobre la concepción de la ciencia moderna y establecía su visión sobre el problema general de las ciencias físicas, que es, en primer lugar:

> [...] buscar las leyes por las que pueden describirse los procesos particulares de la naturaleza a partir de reglas generales. Estas reglas (por ejemplo, la ley de la reflexión y refracción de la luz o la ley de Mariotte y Gay-Lussac sobre los volúmenes de los gases) no son más que ideas generales que conectan los distintos fenómenos asociados a ellas. La rama experimental de la física tiene como objeto encontrar esas leyes. La física teórica busca, por el contrario, desarrollar las causas desconocidas de los procesos a partir de los fenómenos que se pueden observar; busca comprender estos procesos a partir de las leyes de la causalidad.

El investigador basaba la física teórica en la convicción de que todo cambio en la naturaleza debe tener una causa:

> Las causas a las que referimos los fenómenos pueden ser variables o invariables. En el primer caso, esta convicción nos impele a buscar las causas que producen el cambio y así procederemos sucesivamente hasta llegar finalmente a las causas últimas, que son inmutables y que, por tanto, en todos los casos en que las condiciones externas sean las mismas, produzcan los mismos efectos invariables. El fin de las ciencias naturales teóricas es, por tanto, descubrir las causas últimas e inmutables de los fenómenos naturales.

Según el autor, la ciencia representaba los fenómenos del mundo exterior de acuerdo con dos procesos de abstracción: la materia y la fuerza. Sobre la materia afirmaba:

> La ciencia ve la materia simplemente como las cosas que existen, sin tener en cuenta su acción sobre nuestros órganos de los sentidos o la interacción entre ellas. La materia en sí misma es inerte y exenta de acción; en ella solo distinguimos las relaciones de espacio y de cantidad (masa). A la materia así concebida no debemos asociarle diferencias cualitativas, ya que cuando hablamos de diferentes tipos de materia nos referimos a diferencias de acción, esto es, a diferencias entre las fuerzas de la materia. La materia en sí misma solo puede sufrir un cambio referido al espacio, es decir, movimiento.

El concepto de fuerza era introducido como segunda abstracción:

> Los objetos naturales no son pasivos; de hecho, tenemos conocimiento de su existencia solamente por sus acciones sobre los órganos de nuestros sentidos e inferimos de estas acciones que hay algo que actúa. Por tanto, cuando queremos realizar aplicaciones prácticas de nuestra idea de la materia, solo podemos hacerlo por medio de una segunda abstracción, y adscribirle propiedades que al principio fueron excluidas de nuestra idea, es decir, la capacidad de producir efectos o, en otras palabras, de ejercer fuerzas.

Helmholtz continuaba argumentando que fuerza y materia son inseparables y que no es posible concebirlas como conceptos separados. Concluía que el concepto de materia no tiene mayor realidad que el concepto de fuerza, puesto que ambos conceptos son abstracciones.

> Es evidente que en la aplicación de las ideas de materia y fuerza a la naturaleza, estas nunca deben separarse: una masa de pura materia sería, en lo que respecta a nosotros y a la naturaleza, una nulidad, en cuanto que ninguna acción podría trabajar por ella ni sobre nuestros órganos ni sobre otra porción de materia. Por otro lado, una fuerza pura sería algo que debe tener una base, y que al mismo tiempo no tiene base, ya que su base sería la materia pura. Sería erróneo definir la materia como algo que tiene existencia real, y fuerza como una idea que no tiene realidad correspondiente. Ambas, por el contrario, son abstracciones, formadas de forma similar. La materia es solo discernible por sus fuerzas y no por sí misma.

La introducción continuaba explicando cómo todas las fuerzas podían descomponerse en última instancia en fuerzas básicas entre las moléculas de los distintos elementos de la naturaleza. El ensayo proseguía a lo largo de más de cincuenta páginas describiendo matemáticamente cómo todos los procesos causados por estas fuerzas llevaban a la conservación de la energía.

De esta forma Helmholtz redujo brillantemente el problema de la interacción de la materia al problema, más simple, de interacciones puramente mecánicas mediante las fuerzas elementales conocidas, eléctricas, magnéticas y gravitatorias, que las partículas constituyentes de la materia se ejercían entre sí. Así, incluso la transmisión del calor se vería reducida a fuerzas entre partículas. Bajo estas premisas la conservación de la energía surgía por sí misma por las leyes de la mecánica y el electromagnetismo. Tendrían que pasar varias décadas hasta que la teoría de la mecánica estadística proporcionara las relaciones entre las magnitudes microscópicas y macroscópicas, es decir, entre la energía cinética media y la temperatura, que vendrían a confirmar que su teoría era básicamente correcta, es decir, que las interacciones entre cuerpos macroscópicos son realmente la suma de las interacciones entre las moléculas o los átomos que constituyen la materia.

> «La naturaleza posee una reserva de energía que no puede aumentar ni disminuir de ninguna forma: la cantidad de energía en la naturaleza inorgánica es tan eterna e inalterable como lo es la cantidad de materia.»
>
> — Hermann von Helmholtz.

UNA LEY UNIVERSAL

Helmholtz llamó a su principio universal *ley de conservación de la fuerza*. Según este principio, toda transformación de energía tiene lugar bajo relaciones cuantitativas exactamente mensurables, sea en forma de energía cinética, energía eléctrica y magnética, o calor. Helmholtz incluyó en su principio las fuerzas naturales cuyo origen era desconocido. La ley era universalmente válida, incluso en los procesos orgánicos, en los que el problema de la conservación de la energía era si la oxidación y el metabolismo de las sustancias nutritivas generaba una cantidad equivalente de

calor igual a la que producían los animales, algo que Helmholtz estaba entonces investigando en su laboratorio.

La ley de conservación de la energía de Helmholtz sufrió las vicisitudes que siguen al nacimiento de las grandes ideas, generando dudas sobre su originalidad y disputas sobre su prioridad. Fue aclamada con entusiasmo por los físicos y fisiólogos más jóvenes de Berlín, encabezados por Du Bois-Reymond, pero los más viejos rechazaron sus ideas, temiendo que tales especulaciones revivieran el fantasma de la filosofía natural.

> «Bajo la influencia del descubrimiento de Helmholtz de la conservación de la energía, el objetivo de la física está orientado a referir todos los fenómenos a las leyes que gobiernan la transformación de la energía.»
>
> — Heinrich Hertz.

Sin embargo, el gran matemático Carl Gustav Jacob Jacobi (1804-1851), que se encontraba en aquellos años en Berlín, proclamó la importancia del trabajo de Helmholtz. Jacobi, que había realizado profundos estudios sobre los principios de la mecánica (ecuación de Hamilton-Jacobi), comprendió la teoría de Helmholtz y lo comparó con los grandes matemáticos franceses Bernoulli y D'Alembert. Tal elogio por parte de uno de los científicos más ilustres del momento, dio confianza y seguridad a Helmholtz. Veinte años más tarde, el trabajo de Helmholtz fue considerado por el físico Gustav Kirchoff (1824-1887) como «la más importante contribución a la ciencia natural de nuestra era».

LA DISPUTA

Helmholtz no conocía el artículo de Mayer ni sus posteriores escritos sobre la conservación de la energía. Cuando, años más tarde, Helmholtz leyó estos trabajos, tuvo la deferencia profesional de atribuir a Mayer el crédito que justamente merecía como el primero que enunció el principio de conservación de la energía:

> Nadie puede negar que Joule hizo más que Mayer y que muchas de las ideas de Mayer en su primer artículo son confusas. Pero pienso que debemos considerarlo como un hombre que, por sí y para sí mismo, concibió la idea que ha producido el mayor avance reciente posible de la ciencia natural. De ninguna manera su mérito puede ser mermado por el hecho de que otro hombre en otro país, y en un ámbito de actividad diferente, realizara simultáneamente el mismo descubrimiento y lo trabajara posteriormente con mayor perfección.

Con respecto al equivalente mecánico del calor, ese no era uno de los puntos centrales del trabajo de Helmholtz. De hecho, ni siquiera se preocupó de determinarlo de forma precisa. Su preocupación era la interpretación teórica de los fenómenos térmicos mediante su propio formalismo. Aunque Joule ya había publicado en 1845 su artículo con la primera medida del equivalente mecánico del calor, Helmholtz no se apoyó en este resultado para escribir su artículo, ya que conoció el trabajo de Joule durante la preparación final del manuscrito. Además, Joule era un joven científico desconocido y Helmholtz no consideró prudente apoyarse en experimentos sin una base sólida demostrada.

Es probable que Helmholtz pensara que los resultados de Joule eran inexactos debido a un error en la conversión de unidades del sistema británico al sistema alemán (es decir, de grados Fahrenheit, pies y libras a grados centígrados, kilogramos y metros). Parece ser que Helmholtz utilizó el pie francés, una unidad de medida bien conocida, que es igual a 12,8 pulgadas o 0,3251 m, en lugar del pie inglés, que es igual a 12 pulgadas.

El trabajo de Helmholtz sobre la conservación de la energía significó el preámbulo de su exitosa carrera. Gracias a él comenzó a adquirir renombre no solo entre los físicos, sino también entre los fisiólogos, que reconocieron en esta ley una valiosa arma contra el vitalismo.

CAPÍTULO 2

Hacia una teoría de la visión

Helmholtz comenzó a desarrollar en la Universidad de Königsberg su teoría de la percepción, la cual le llevó a realizar algunos de sus más importantes experimentos e invenciones. Aplicó sus conocimientos de física y matemáticas a sus estudios sobre la óptica y el movimiento ocular, la visión del color y la percepción visual del espacio, que culminaron en la publicación del *Tratado de óptica fisiológica*, que fue manual de referencia durante más de medio siglo.

Mientras Helmholtz trabajaba en sus experimentos sobre el calor de la acción muscular y elaboraba su demostración de la conservación de la energía, tuvo lugar un feliz acontecimiento. Se prometió en matrimonio con Olga von Velten. Esta joven se había mudado a Potsdam junto con su madre y su hermana tras la muerte de su padre. Olga procedía de una familia distinguida: su padre había sido cirujano mayor y su abuelo fue un húsar de la caballería prusiana que había tenido una actuación destacada en la Guerra de los Siete Años: durante la batalla de Kunersdorf, que tuvo lugar el 12 de agosto de 1759 y en la que el ejército alemán fue derrotado por las tropas rusas, Velten, junto con el capitán Joachim Bernhard von Prittwitz, salvó la vida del rey Federico II, ayudándolo a escapar en su propio caballo. Por tal heroicidad recibió el título de barón. La madre de Olga era hija de Hofrath Puhlmann, pintor de la corte de Federico II y director de la galería de arte fundada por el rey.

Helmholtz fue presentado a la familia Velten en diciembre de 1846 y pronto fue aceptado como uno más de la familia. A menudo tocaba el piano con Olga, que era una excelente cantante y poseía una gran inteligencia. Tres meses después ambos jóvenes se prometieron: el desposorio tuvo lugar el 11 de marzo de 1847, pero la boda solo se celebraría cuando Hermann encontrara un puesto de trabajo permanente. Olga, nacida en 1827, tenía en aquellos momentos diecinueve años, seis menos que su prometido.

LA TEORÍA DE LA PERCEPCIÓN

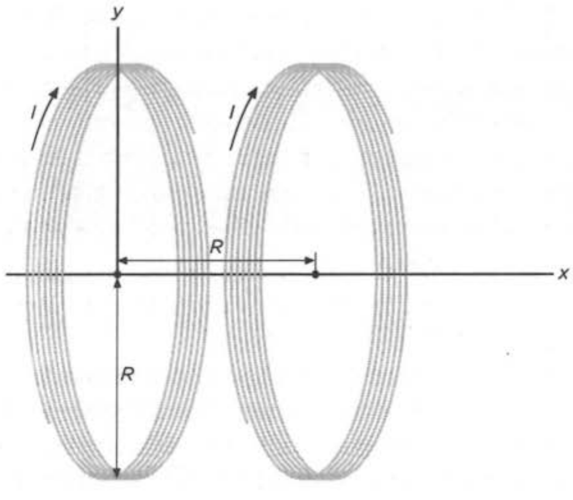
La situación laboral de Helmholtz cambió en 1848. Su amigo Brücke era por aquel entonces profesor de Anatomía en la Academia de Artes y asistente en el Museo de Anatomía y Zoología de Berlín. El puesto quedó vacante cuando Brücke ocupó una plaza de profesor de Fisiología en Königsberg. Müller redactó una carta al ministro de Educación en la que respaldaba la candidatura de Hermann, elogiando su competencia y las múltiples facetas de su cultura científica, así como los prometedores resultados que auguraban sus investigaciones. La carta dio resultado. El ministro estableció una prueba que se celebró el 19 de agosto de 1848, en la que Helmholtz tuvo que impartir una lección magistral ante un tribunal y los profesores de la Academia. En esta lección, esbozó por primera vez su teoría de la percepción.

Para Helmholtz, el genio de los artistas de la Antigüedad consistía en su intuición para percibir y representar los contenidos idealizados de su obra de forma fiel y justificada. El éxito del artista radicaba en la emoción que suscitaba su obra. En su exposición, recordó aquella anécdota según la cual un detalle indefinido en una estatua de Apolo le hacía imposible admirar sin reservas la obra. Descubrió que se trataba de un error anatómico que no había notado inmediatamente. El músculo deltoides de la espalda estaba representado como si partiera de un punto de la columna, cuando en realidad se origina en una región más amplia. Helmholtz razonaba que la percepción global que un espectador tiene de una obra de arte se originaba mediante un *análisis visual inconsciente* de los detalles y que, la inexactitud de alguno de ellos, producía una impresión estética desfavorable.

Con este razonamiento, Helmholtz delineó la teoría de la *inferencia inconsciente de los sentidos*, que sería parte importante de su teoría de la percepción y el fundamento de sus trabajos en psicología. Su lección satisfizo al tribunal y, finalmente, fue propuesto para el puesto. A instancias de Alexander von Humboldt (1769-1859), la máxima autoridad científica de Berlín, Helmholtz fue dispensado de los tres años de servicio militar que aún le que-

LAS BOBINAS DE HELMHOLTZ

En marzo de 1849 Helmholtz publicó el artículo «Principios de construcción de un galvanómetro tangente», en el que introdujo por primera vez las que ahora se denominan *bobinas de Helmholtz*. Cuatro años más tarde se presentó en París un galvanómetro con el mismo sistema, pero Helmholtz no llegó a reclamar la prioridad de su descubrimiento. El galvanómetro tangente era un instrumento construido en 1837 por Claude Pouillet (1791-1868) para medir la intensidad de una corriente eléctrica. Consistía en una brújula en posición horizontal rodeada por un anillo o bobina de cobre enrollado por el que se hacía circular una corriente eléctrica. Esta generaba un campo magnético que era aproximadamente perpendicular al plano de los anillos en su centro. En ausencia de corriente, el plano de los anillos debía alinearse con la aguja magnética apuntando al norte. Al circular una corriente, el campo magnético creado por la bobina era perpendicular al campo magnético de la Tierra y desviaba cierto ángulo la aguja magnética. La corriente eléctrica era proporcional a la tangente de este ángulo. De ahí el nombre del instrumento. El primer galvanómetro tangente presentaba el problema de que el campo magnético solo era perpendicular a la bobina en su punto central, de manera que, al desviarse la aguja magnética, el campo dejaba de ser perpendicular y se cometía un error considerable al intentar determinar la corriente. Helmholtz mejoró el diseño al determinar que, añadiendo una segunda bobina semejante a la primera y separándolas una distancia igual a su radio (véase la figura), el campo magnético en el que se movía la aguja de la brújula era prácticamente constante.



daban y fue desmovilizado. Al dejar el ejército, también abandonó para siempre la práctica de la medicina.

En 1849 su amigo Brücke volvió a cambiar de puesto al aceptar una oferta de trabajo en la Universidad de Viena, dejando vacante su plaza de profesor en Königsberg. Para Helmholtz, era una oportunidad única de obtener un puesto más favorable para sus intereses científicos. Müller escribió de nuevo al ministro sugiriendo las candidaturas de sus tres pupilos: Du Bois-Reymond, Helmholtz y Ludwig. Du Bois-Reymond prefirió permanecer en Berlín y, finalmente, Helmholtz fue elegido para la plaza. De este modo, el 19 de mayo de 1849 fue nombrado profesor extraordinario de Fisiología en Königsberg y director del Instituto Fisiológico de dicha ciudad. Era un puesto fijo con un salario sustancioso —sobre todo para un joven que todavía no había cumplido veintiocho años—, que igualaba el sueldo de su padre como profesor de instituto.

Unos meses después, el 26 de agosto, Hermann se casó con Olga en el pequeño pueblo de Dahlem, cerca de Berlín. La ceremonia se celebró en la iglesia de esta localidad y luego los invitados y familiares se dirigieron en festiva procesión hasta la casa de la hermana de la novia, donde tuvo lugar la celebración. Inmediatamente después, la feliz pareja partió hacia su nuevo hogar en Königsberg.

LOS GRÁFICOS DE LA CONTRACCIÓN MUSCULAR

La ciudad de Königsberg se encontraba en el extremo nordeste de Prusia, a orillas del mar Báltico. Su clima era muy húmedo y con densa y frecuente niebla; en invierno, la temperatura podía bajar de los –15 °C. Este tiempo resultaba insufrible para Olga, que era de salud frágil, y ello tuvo graves consecuencias en el transcurso de unos pocos años.

La Universidad de Königsberg, llamada la Albertina, había alcanzado un considerable prestigio científico desde que el gran filósofo Kant impartiera allí clases hasta su muerte en 1804. Allí Helmholtz tuvo oportunidad de conocer al filósofo Karl Rosenkranz (1805-1879), que había sido discípulo de Hegel. Entró

KÖNIGSBERG

Königsberg, la ciudad que fue el hogar de Helmholtz entre 1849 y 1855, perteneció a Alemania hasta la Segunda Guerra Mundial; en 1945 fue anexionada por la Unión Soviética y hoy es la ciudad rusa de Kaliningrado. Separada de Rusia por Polonia y Lituania, es el único puerto ruso en el mar Báltico que está libre de hielo todo el año. Su universidad, conocida como la Albertina, fue fundada en 1544 por Alberto I de Prusia para propagar la fe luterana y se convirtió en un importante centro científico. La ciudad se hizo famosa en los círculos matemáticos del siglo XVIII a raíz del problema de los siete puentes, que resolvió en 1736 Leonhard Euler (1707-1783). El río Pregolya dividía Königsberg en cuatro secciones distintas, conectadas por siete puentes. El problema consistía en determinar si era posible recorrer los siete puentes volviendo al punto de partida sin atravesar ningún puente más de una vez. Euler demostró que no era posible, abstrayendo el problema e introduciendo la noción de grafo, lo que dio lugar a la teoría de grafos en matemáticas. El más importante pensador de Königsberg fue el filósofo Immanuel Kant, que fue profesor de la Albertina. Entre los importantes científicos nacidos en la ciudad cabe mencionar al gran matemático David Hilbert (1862-1943), que fue profesor de Matemáticas en la Albertina entre 1886 y 1895. También debe citarse a Arnold Sommerfeld (1868-1951), uno de los fundadores de la mecánica cuántica y la física atómica, que estudió matemáticas en la misma universidad.



Uno de los famosos puentes de Königsberg, el Köttelbrücke, en una fotografía tomada en 1904.

en contacto profesional con el físico Franz Ernst Neumann (1798-1895) y ambos discutieron acerca de la integración de las matemáticas y las técnicas experimentales en física. Trabó amistad con Gustav Kirchhoff (1824-1887), estudiante de Neumann, que años más tarde sería conocido por sus trabajos sobre electricidad.

Helmholtz consiguió que le cedieran una habitación en el edificio principal de la universidad, donde instaló sus instrumentos y puso en marcha sus experimentos. Su joven esposa Olga se hallaba con él en todo momento, prestando una ayuda muy necesaria. Sus experimentos sobre la contracción muscular y la velocidad de los nervios eran muy complejos técnicamente y había que prestar atención a varias cosas al mismo tiempo. Hermann la llamaba «la directora de protocolo en las observaciones de las divisiones de la escala».

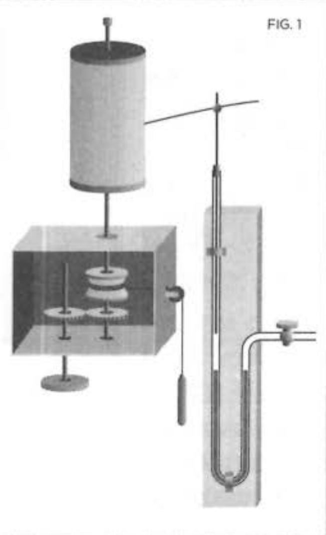
De acuerdo con sus experimentos sobre la contracción muscular, la energía química se transformaba en trabajo y calor en el músculo. Helmholtz ya había estudiado los aspectos químicos, eléctricos y térmicos del fenómeno. El siguiente paso era medir directamente el trabajo realizado por el músculo. Se propuso así medir la contracción del músculo de una rana levantando un pequeño peso atado a la extremidad. La contracción de un músculo sin ninguna resistencia al movimiento contribuía principalmente a modificar el estado en reposo del músculo y no realizaba trabajo apreciable.

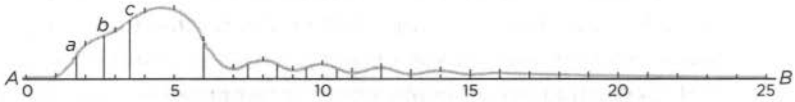
Helmholtz se enfrentaba al problema adicional de observar el proceso de contracción, casi instantáneo, que resultaba de un único estímulo de corta duración. Su amigo Carl Ludwig había construido un instrumento para registrar gráficamente los rápidos cambios de presión de la sangre arterial (figura 1). Este aparato se denominó *quimógrafo* y es el antecesor de los modernos polígrafos.

Helmholtz adaptó el quimógrafo para construir su propio instrumento, que se denominó *miógrafo* (del griego *mys*, «músculo», y *graphein*, «trazar»). Este aparato permitía registrar las contracciones musculares en función del tiempo, trazando las alturas a las que era alzado un peso colgado del músculo en puntos temporales sucesivos. Consistía en un tambor o cilindro de metal giratorio, movido por un mecanismo pendular. Un brazo horizontal terminado en una punta de acero estaba conectado al

Imagen esquemática del quimógrafo desarrollado por Carl Ludwig, el aparato del que partió Helmholtz para crear su miógrafo.

FIG. 1





Curva de la contracción muscular obtenida por Helmholtz con su miógrafo.

músculo de la rana, de manera que subía cuando este se contraía, dejando una marca en el cilindro (figura 2). En la página 87 se ilustra un miógrafo en un grabado de época.

Las curvas musculares que obtuvo eran tan pequeñas que tuvo que observarlas con un microscopio y realizar a mano alzada copias de ellas. Los resultados evidenciaban que la energía del músculo no se desarrollaba en el mismo momento que el estímulo, sino que, una vez el estímulo había cesado, la energía se incrementaba gradualmente, alcanzaba un máximo y luego decaía lentamente.

Los gráficos permitían interpretar físicamente la relación entre el trabajo mecánico desarrollado en el músculo y la energía. Sin embargo, con este método —debido a la fricción entre el estilógrafo y el tambor— no era posible acotar con precisión el intervalo de tiempo inicial de la contracción. Helmholtz llegó a la conclusión de que debía utilizar un método distinto para medir el desfase aparente entre el estímulo eléctrico y la respuesta muscular. Esto le llevó a descubrir la velocidad de los impulsos nerviosos.

LA VELOCIDAD DE LOS IMPULSOS NERVIOSOS

La determinación de la velocidad del impulso nervioso fue un experimento fundamental para la psicología y la fisiología del siglo XIX. Antes de 1850 se creía que su propagación era prácticamente instantánea, ya que no se concebía que pudiera ser apreciable el lapso de tiempo que transcurre entre el acto consciente de mover un músculo y la percepción de ese movimiento. Müller pensaba que tal velocidad era próxima a la de la luz y que era imposible medirla. Pero en 1850 Helmholtz midió la velocidad de la propagación en el nervio de la rana y encontró que era inferior a 50 m/s.

El físico francés Claude Pouillet había descubierto en 1844 un método para medir pequeños intervalos de tiempo. Cuando hacía pasar un pulso de corriente por un galvanómetro, la aguja comenzaba a moverse cuando el pulso había cesado, y su ángulo de desviación aumentaba con el tiempo de duración de la corriente. Calibrando el instrumento adecuadamente era posible convertir los ángulos de desviación en los correspondientes intervalos de tiempo. Este es el fundamento del llamado *galvanómetro balístico*. Helmholtz lo usó para medir el tiempo transcurrido desde que se aplicaba la corriente al músculo de una rana hasta que este reaccionaba y se contraía. En su experimento, una corriente eléctrica atravesaba al mismo tiempo el músculo y el galvanómetro. El músculo estaba sujeto a un peso y a un interruptor, que era accionado cuando se contraía, interrumpiendo la corriente.

«Afortunadamente, las distancias que las percepciones de nuestros sentidos tienen que atravesar hasta alcanzar el cerebro son pequeñas. Si no, nuestra conciencia estaría siempre retrasada con respecto al presente.»

— Hermann von Helmholtz.

Helmholtz encontró que, estimulando el nervio en distintos puntos, alternativamente más lejos y más cerca del músculo, la contracción llegaba un poco más tarde en el primer caso. Este retraso temporal era el tiempo que tardaba el impulso en recorrer la distancia que separaba los dos puntos del nervio. Esta distancia era de unos 5 a 6 cm y el intervalo de tiempo registrado estaba entre los 0,0014 y los 0,0020 segundos, mientras que la velocidad de la propagación resultante estaba entre los 25 y los 43 m/s.

Para analizar sus resultados, Helmholtz tuvo que resolver los inevitables problemas de los errores experimentales, tales como los asociados a la medida de la distancia entre los puntos que eran estimulados. Aplicó aquí por primera vez las técnicas estadísticas que aprendió de Neumann, especialmente el método de los mínimos cuadrados, que era utilizado por los astrónomos, pero raramente por los fisiólogos. Estas técnicas le permitieron

establecer la velocidad media de propagación del impulso nervioso en 26,4 m/s.

Los resultados de este experimento eran totalmente novedosos. En enero de 1850 Helmholtz envió el artículo «Sobre la velocidad de transmisión del impulso del nervio» a la Academia de Ciencias de Berlín. Con tan solo tres páginas no era fácil explicar de una forma comprensible los principios físicos de su instrumento, el método utilizado y los cálculos estadísticos. Al principio solo Du Bois-Reymond entendió los razonamientos de Helmholtz y pudo convencer a Müller, pero, al final, el propio Humboldt felicitó a Hermann por su importante descubrimiento y por el gran talento demostrado en el experimento. Un artículo más detallado, «Medidas de las relaciones temporales en la contracción de los músculos animales y la velocidad de propagación en el nervio», fue publicado en diciembre de 1850 en *Müller's Archiv*.

Años más tarde, el fisiólogo francés Étienne Jules Marey (1830-1904) explicó el fundamento del experimento de Helmholtz con un símil ferroviario. Supongamos, decía, que se envía una carta de París a Marsella y conocemos el instante preciso en que la carta llega a su destinatario, así como la hora en que el tren postal sale de París. Con esta información no es posible determinar la velocidad del tren, ya que, desde su llegada a la estación, transcurre un tiempo hasta que la carta es repartida. Para conocer la velocidad exacta del tren es necesario conocer el momento en que este pasa por alguna estación intermedia, por ejemplo, la estación de Dijon. Entonces sabremos el tiempo que tarda la carta desde Dijon hasta que es repartida en Marsella. Dividiendo la diferencia entre estos dos tiempos (París-Marsella y Dijon-Marsella) entre la distancia entre París y Dijon, determinaremos la velocidad del tren. Esto es exactamente lo que hizo Helmholtz en su experimento.

El investigador había comenzado también a tomar medidas de tiempos de reacción en humanos, experimentando con él mismo y otros voluntarios. Pudo establecer así que la velocidad de transmisión en los nervios humanos era de unos 50 a 60 m/s. En todos estos experimentos contó con la valiosa ayuda de su esposa Olga, que estaba encinta y en junio de 1850 dio a luz a su primera hija, Katherina Caroline Julie Betty Helmholtz.

EMIL DU BOIS-REYMOND (1818-1896)



Du Bois-Reymond, el eterno amigo y colega de Helmholtz, fue alumno de Müller y sucedió a este en su cátedra de Fisiología de Berlín. En 1843 publicó su primer artículo sobre la electricidad animal. Sus dos volúmenes sobre este tema se convirtieron en clásicos. La electricidad animal se conocía desde que, hacia 1745, Luigi Galvani (1737-1798) experimentó estimulando muslos de ranas con descargas eléctricas y, más tarde, descubrió que podía hacer mover la pierna tocando el nervio con un electrodo de bronce, el pie con un electrodo de plata, y cerrar el circuito uniendo ambos metales. Galvani nunca supo que había construido la primera pila eléctrica. La corriente continua se denominaría corriente galvánica en su honor. El origen animal de las corrientes galvánicas hizo pensar a Müller, erróneamente, que los impulsos nerviosos eran corrientes eléctricas. Du Bois-Reymond investigó, por sugerencia de Müller, la «corriente de herida», generada al conectar la superficie de un músculo con una herida en el mismo. Esto le hizo formular su teoría sobre la polarización de los tejidos animales, ya que los nervios y los músculos contenían partículas cargadas eléctricamente, positiva en un lado y negativa en el otro. Aunque esta teoría era errónea, Du Bois-Reymond debe recibir crédito por aplicar métodos físicos al estudio de la electricidad animal, encaminando así las investigaciones posteriores. Sus experimentos sacaron al impulso nervioso del campo místico de la fuerza vital y lo llevaron hacia el ámbito de la ciencia, e influyeron en Helmholtz, haciéndole pensar que la velocidad del impulso es finita y medible.

El experimento de Helmholtz abrió el camino a los trabajos posteriores en psicología experimental y contribuyó a la convicción de que mediante medidas experimentales controladas podrían llegar a desentrañarse los misterios de la mente y del sistema nervioso.

En los años siguientes, Helmholtz perfeccionó su miógrafo para poder demostrar la velocidad de propagación ante el público,

ya que el galvanómetro balístico requería una complicada preparación experimental. Usando su miógrafo mejorado, le era posible superponer las dos curvas correspondientes a dos excitaciones sucesivas en distintos puntos del nervio. Si dos curvas se registraban una tras la otra, de modo que el estilógrafo partiera del mismo punto en el momento de la excitación, podía observarse que una curva estaba ligeramente desplazada respecto a la otra. A partir de este desplazamiento se podía determinar la velocidad del impulso como de 27,25 m/s, una cifra compatible con la medida que había obtenido con el galvanómetro.

EL OFTALMOSCOPIO

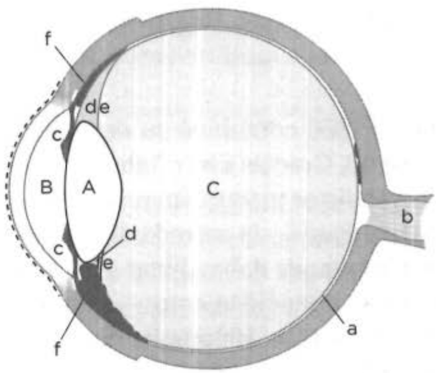
A finales de 1850 Helmholtz hizo un descubrimiento que revolucionó el campo de la oftalmología y que le condujo a inventar el *oftalmoscopio*. Junto con el principio de conservación de la energía y la determinación de la velocidad del impulso nervioso, el oftalmoscopio terminó por establecer e impulsar su prestigio científico.

> «He hecho un descubrimiento que puede ser de la máxima importancia en oftalmología. Era tan obvio que parece casi ridículo que yo, y otros, hayamos tardado tanto en verlo.»
>
> — Hermann von Helmholtz.

El 6 de diciembre de 1850 comunicó su descubrimiento a la Sociedad de Física de Berlín. Gracias a su oftalmoscopio, los vasos sanguíneos del interior del ojo se mostraban con toda claridad, con la bifurcación de arterias y venas, y la entrada del nervio óptico. En aquel tiempo, las alteraciones que daban lugar a las enfermedades oculares más importantes (conocidas como «cataratas negras») eran prácticamente desconocidas. Helmholtz comprendió que su descubrimiento hacía posible la investigación minuciosa de la estructura interna del ojo.

ANATOMÍA DEL OJO HUMANO

El principio del oftalmoscopio se basa en la transparencia de los elementos centrales del ojo. En su *Tratado de óptica fisiológica*, Helmholtz describió con todo detalle la anatomía y fisiología del ojo, con el siguiente esquema de la sección horizontal de un ojo humano (véase la figura). El ojo es una cámara oscura globular hecha de una sustancia blanca, gruesa y fuerte denominada *esclerótica*, que se ve parcialmente entre los párpados como «el blanco del ojo». El ojo contiene tres elementos transparentes: el *humor acuoso* en la cámara anterior del ojo (B), la lente del *cristalino* (A) y el *humor vítreo* (C), sustancia gelatinosa que llena el interior del globo ocular. La *córnea* es una lente convexa y transparente, fija en la parte anterior de la esclerótica como el cristal de un reloj, de textura firme y posición y curvatura constantes. Al igual que una cámara fotográfica, el ojo puede enfocar objetos cercanos o distantes cuando incide la luz en su parte posterior interna, donde se encuentra la *retina* (a), extensión membranosa y delgada del *nervio óptico* (b). La acomodación o enfoque del ojo se produce mediante el movimiento del cristalino, situado detrás de la córnea. Este está cubierto por una cortina de color variable o *iris* (c) y perforado en el centro, con un agujero redondo, la *pupila,* cuyos bordes están en contacto con el cristalino. A través de esta abertura pasa la luz al interior del ojo e incide en la retina. La lente del cristalino es circular, biconvexa y elástica; está unida en su borde al interior del ojo mediante una banda circular que es una membrana plegada que la rodea o *cuerpo ciliar* (d-e). La tensión de este anillo (y, por tanto, del cristalino) está regulada por una serie de fibras musculares o *músculo ciliar* (f). Cuando este músculo se contrae, la tensión de la lente disminuye y su superficie se hace más convexa que cuando el ojo está en reposo. Su poder de refracción se incrementa y las imágenes de los objetos más cercanos son enfocadas en la parte posterior de la cámara oscura del ojo.



El principio físico del oftalmoscopio requería determinados conocimientos de óptica. El descubrimiento fue accidental y se produjo cuando Helmholtz tuvo que explicar a sus estudiantes la teoría de la emisión de la luz reflejada por el ojo, que había descubierto Brücke. Esta se basaba en el hecho familiar de que los ojos de ciertos animales, como los gatos y los búhos, brillan en la oscuridad. Johannes Müller había interpretado que los ojos no brillaban, sino que en realidad reflejaban la luz. Brücke había encontrado que todos los ojos podían hacerse brillar, tanto los de los animales como los de las personas, cuando el haz de una linterna los iluminaba y el observador se colocaba tras la linterna. El primer ojo humano que hizo brillar en la oscuridad fue el de Du Bois-Reymond. Pero todos los intentos posteriores de Brücke de construir un instrumento para la iluminación de la retina fallaron a causa del método de iluminación utilizado.

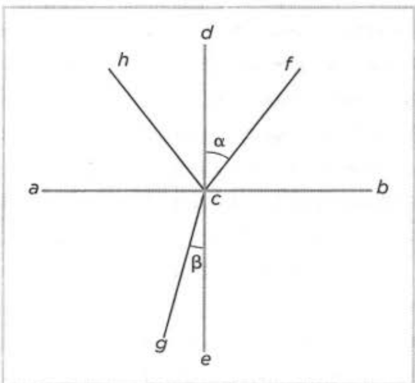
Helmholtz se preguntó por qué cuando miramos al ojo vemos la pupila completamente negra. Como la pupila es transparente, en realidad lo que estamos viendo es el interior del ojo. Pero bajo circunstancias normales no podemos ver los puntos iluminados de la retina en el fondo del ojo, debido a que parte de la luz que incide en la retina es absorbida y, comparativamente, poca luz se refleja.

Los rayos de luz entran y salen del ojo exactamente con la misma trayectoria, volviendo al punto inicial de iluminación. Por tanto, para que un observador pudiera ver los rayos reflejados por el ojo, bastaría con alinear su campo de visión con la trayectoria de la luz reflejada. Pero, al hacer esto, la cabeza del observador interceptaría también los rayos de luz incidentes (haría «sombra»), impidiendo que estos entraran en el ojo. Solo en el caso en que el ojo observado no fuera un perfecto sistema refractivo, parte de la luz reflejada se desviaría un pequeño ángulo con respecto a la luz incidente. Entonces sería posible, para un observador que se colocara lo más cerca posible de la línea de la luz incidente, percibir una pequeña fracción de la luz reflejada. Esto producía la luminosidad del ojo humano que había observado Brücke.

Para observar toda la luz reflejada por la retina, era necesario un método de iluminación que permitiera mirar al ojo en línea con la luz incidente. Helmholtz descubrió que esto podía hacerse su-

LAS LEYES DE LA REFLEXIÓN Y LA REFRACCIÓN

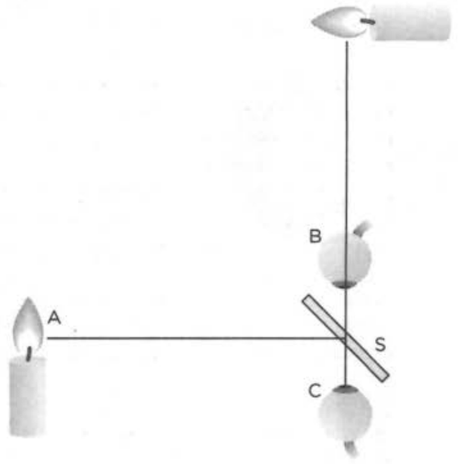
El ojo humano altera las trayectorias de la luz mediante el mecanismo físico de la refracción. Cuando un rayo de luz incide sobre una superficie que separa dos medios isótropos, parte de la luz se refleja y parte se refracta, es decir, se transmite al otro medio. Helmholtz describía este fenómeno físico en su *Tratado de óptica fisiológica* con el siguiente diagrama (véase la figura). La línea *ab* representa la superficie sobre la que incide el rayo *fc*, formando un ángulo α con la normal a la superficie, que es la línea perpendicular *dc*. Todos los ángulos se miden con respecto a la normal. Las líneas *ch* y *cg* representan los rayos reflejado y refractado, respectivamente. Cuando los medios son isótropos se cumplen las tres leyes de la reflexión y de la refracción: los rayos incidente, reflejado y refractado están en el mismo plano; el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia, y el ángulo de refracción y el ángulo de incidencia están relacionados de modo que los senos de estos ángulos tienen la misma proporción que las velocidades de propagación de la luz en los dos medios. La razón entre la velocidad de la luz en el vacío y su velocidad en un medio se denomina *índice de refracción* del medio. Si *c* es la velocidad en el vacío y c_1 y c_2 son las velocidades de la luz en el primer y segundo medio, respectivamente, entonces $n_1 = c/c_1$ es el índice de refracción del primer medio y $n_2 = c/c_2$ el del segundo medio; la ley de la refracción se suele expresar en la forma siguiente: n_1 senα = n_2 senβ. Por definición, el índice de refracción del vacío es la unidad. Para el aire a presión y temperaturas ordinarias difiere tan poco de la unidad (1,00029), que a todos los efectos la diferencia puede despreciarse.



perponiendo una placa plana paralela de cristal (S) formando 45° con la línea entre el ojo observador (B) y el observado (C), e iluminando perpendicularmente dicha línea (A), como si la fuente real proviniera de detrás del observador (figura 3). Esto es debido a que parte de la luz que incide en el cristal se refleja con un ángulo igual al incidente y penetra en el ojo C, iluminando su retina.

La luz que se refleja en la retina sigue el camino inverso e incide de nuevo en el cristal, transmitiéndose en parte y pudiendo ser observada por B. La intensidad de la iluminación mejoraba si el cristal se sustituía por un espejo con un pequeño orificio por el que podía pasar la luz y observar la retina.

FIG. 3

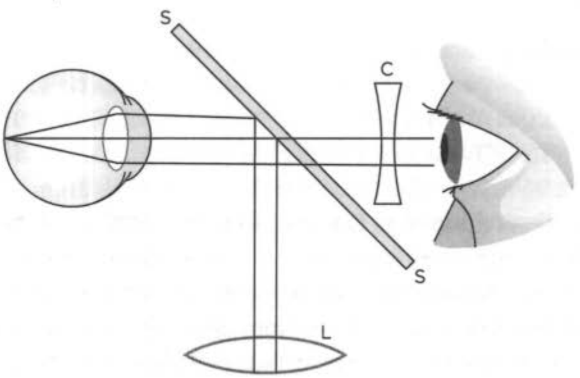


Principio de iluminación del oftalmoscopio según Helmholtz.

Aunque bajo estas condiciones el observador podía columbrar el fondo iluminado del ojo, en general no alcanzaba a observar ninguno de sus detalles. Para acomodar la imagen reflejada de la retina se tenían que utilizar lentes de vidrio apropiadas. Así, por ejemplo, interponiendo entre el espejo y el observador una lente cóncava, se podía ver la imagen ampliada de la retina (figura 4).

Helmholtz estableció las mejores condiciones para construir su oftalmoscopio. El espejo consistía en tres placas paralelas de vidrio inclinadas 56° horizontalmente con respecto al eje de vi-

FIG. 4



Esquema simplificado del oftalmoscopio de Helmholtz con un espejo y una lente cóncava (C). La fuente luminosa está situada en L.

FIG. 5



El oftalmoscopio de Helmholtz.

sión. Delante del espejo colocó dos discos giratorios, cada uno con cinco orificios, en cuatro de los cuales se habían insertado lentes cóncavas. El observador podía girar los discos haciendo coincidir cualquiera de las ocho lentes, o cualquier combinación de ellas, con el eje de visión. Este instrumento (figura 5) terminaba en un mango de madera para sujetarlo con la mano frente al ojo del paciente, con una lámpara brillante a su lado, separada del paciente por una pantalla. Helmholtz encontró numerosas aplicaciones de su oftalmoscopio, con el que realizó muchas de sus investigaciones posteriores sobre la fisiología del ojo.

EL OFTALMÓMETRO

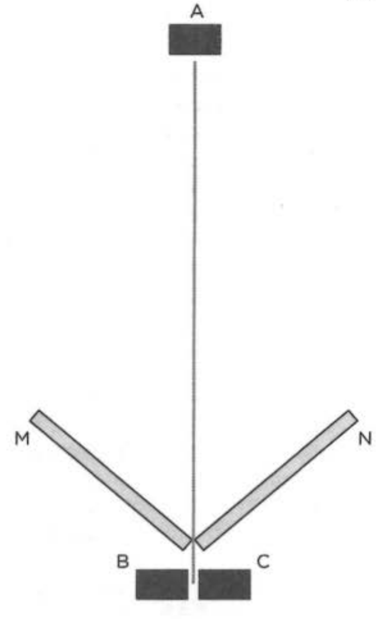
El oftalmoscopio era tremendamente útil para el diagnóstico clínico del ojo y las observaciones cualitativas, pero no permitía realizar medidas ópticas de precisión. Helmholtz lo modificó para construir el primer oftalmómetro (véase la página 87). Su uso más frecuente se dio en investigación fisiológica y en medidas de la dióptrica del ojo, aunque su utilidad no se limitó a este último ámbito. El oftalmómetro de Helmholtz se desarrolló a partir del heliómetro utilizado por los astrónomos para determinar las dimensiones de los planetas.

El fundamento físico del heliómetro es el siguiente. Cuando un rayo de luz atraviesa un cristal de caras paralelas, debido a la refracción, el rayo saliente es paralelo al incidente, pero desplazado una cierta distancia, que depende del ángulo de incidencia. Por tanto, si miramos un objeto a través de un cristal oblicuo, veremos que su tamaño no cambia, pero sí su posición. Si en lugar de uno, colocamos dos cristales, uno junto al otro, oblicuos al observador y formando un ángulo entre sí (figura 6), se observará una imagen doble del objeto. Ajustando el ángulo entre los cris-

tales hasta que las dos imágenes se toquen, se puede calcular el tamaño del objeto; acoplando los dos cristales a un telescopio y conociendo su aumento se pueden medir con precisión los tamaños de objetos lejanos.

A partir de su oftalmoscopio, acoplando dos pequeñas placas de cristal giratorias y un telescopio, Helmholtz inventó el oftalmómetro. El instrumento podía utilizarse para realizar mediciones precisas de imágenes en la córnea de un paciente. Iluminando el ojo con dos lámparas separadas cierta distancia y midiendo las dimensiones de la imagen en la retina, podía calcularse el radio de curvatura de las distintas zonas de la córnea. La córnea aproximadamente es un elipsoide. En su *Tratado de óptica fisiológica*, Helmholtz proporcionaba las medidas de las dimensiones geométricas de la córnea de tres sujetos que él mismo había realizado. Los pacientes eran tres mujeres anónimas de entre veinticinco y treinta años de edad, cuyas iniciales aparecían en el encabezamiento de la tabla. El primer nombre, O.H., probablemente correspondía a su mujer Olga.

FIG. 6



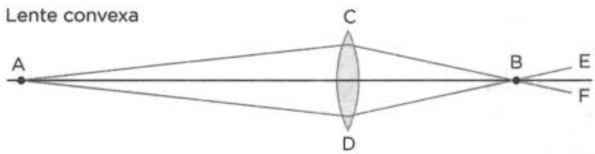
Esquema del fundamento del heliómetro. El objeto A es visto a través de dos cristales M y N colocados oblicuamente al observador y formando un ángulo entre sí. Cada cristal produce una imagen del objeto desplazada una cierta distancia. El resultado son dos imágenes desplazadas (B, C).

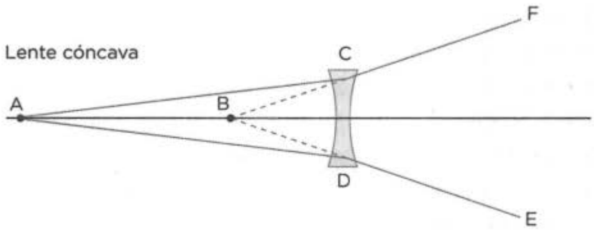
La posibilidad de medir *in vivo* las dimensiones de los distintos elementos del interior del ojo con el oftalmómetro significó un importante avance en el campo de la oftalmología. Hasta entonces las medidas existentes se habían realizado en cadáveres, pero no eran fiables, puesto que los elementos del ojo cambian en los ojos seccionados, sobre todo la convexidad de la córnea, que depende de la presión de los fluidos.

Como detalle morboso, en el *Tratado de óptica fisiológica* Helmholtz incluía una tabla de datos medidos en ojos de cadáveres. La descripción de la tabla detallaba la truculenta procedencia de los ojos:

LENTES CÓNCAVAS Y CONVEXAS

En el ojo, las leyes de la refracción se simplifican cuando la luz incide casi perpendicularmente en superficies esféricas, o aproximadamente esféricas, como la lente del cristalino. Otra simplificación es la producida en un sistema de superficies esféricas alineadas de forma que sus centros de curvatura caigan en una misma línea recta, denominada *eje óptico* del sistema. En este caso todos los rayos de luz que emergen de un objeto puntual y que se refractan a través de un sistema de superficies esféricas refractivas, siendo los ángulos de incidencia pequeños, convergen en un único punto, denominado *imagen óptica* del objeto. La figura adjunta muestra dos ejemplos de tales sistemas ópticos: una lente de cristal convexa (diagrama superior) y una lente cóncava (diagrama inferior). La lente convexa C-D produce una imagen real del objeto A en el punto B al otro lado de la lente, ya que los rayos E y F que emergen de A convergen en B. A partir de aquí los rayos siguen su camino, como si B fuese la fuente luminosa original. Un observador situado a la derecha tendrá la impresión visual de que el objeto A se encuentra en B. La lente cóncava, por su parte, produce una imagen *virtual,* ya que los rayos que salen de la lente divergen hacia la derecha, pero si sus trayectorias se extienden hacia atrás convergen en el punto B, situado a la izquierda de la lente. A un observador situado a la derecha le parecerá que el objeto está situado en B. Supongamos que hay varios puntos luminosos en un plano perpendicular al eje, y tan cerca de A que sus rayos inciden sobre la superficie de la lente formando ángulos pequeños con la normal. Entonces las imágenes de dichos puntos, sean reales o virtuales, también estarán situadas en un plano perpendicular al eje. Su disposición geométrica relativa será similar a la distribución original de los puntos luminosos. Si los puntos luminosos corresponden a un objeto, la imagen óptica del objeto será similar a él.





El primero era de un hombre ahogado de treinta años; el segundo, el ojo derecho de un hombre de sesenta años que murió degollado; el tercero y cuarto eran los ojos de un hombre de cuarenta años que murió ahorcado; el quinto, sexto, séptimo y octavo eran los ojos de dos hombres de veinte y veintiún años, respectivamente, que fueron ejecutados por la espada. Las medidas están dadas en líneas de París (1 línea de París = 2,2558 mm).

LA PRIMERA GRAN GIRA CIENTÍFICA

Al finalizar el curso de 1851 Helmholtz decidió recorrer las principales universidades de Alemania y Suiza para demostrar la eficacia de su oftalmoscopio. Tras acompañar a su esposa Olga y a su hija Katherina, que ya había cumplido un año, al pueblo de su familia en Dahlem, inició su viaje (la figura 7 muestra las ciudades que visitó). En la Universidad de Gotinga conoció a Wilhelm Eduard Weber (1804-1891), uno de los más importantes físicos de Alemania, conocido por sus trabajos sobre electromagnetismo, realizados junto a Gauss, y se reunió con médicos y fisiólogos a los que hizo demostraciones de su oftalmoscopio; todos ellos estaban familiarizados con su estudio sobre la velocidad de propagación del impulso nervioso. En Gotinga conoció también al filósofo Rudolph Hermann Lotze (1817-1881), de quien adoptó el concepto de *signo* en su teoría de la visión.

FIG. 7



Tras Gotinga, Helmholtz visitó Marburgo, Giessen, Frankfurt y Heidelberg, donde Jakob Henle (1809-1885), profesor de la Facultad de Medicina, le sugirió la posibilidad de ofrecerle un puesto de profesor en su universidad. Continuó hacia el sur hasta Zúrich, donde Carl Ludwig era profesor de Anatomía. Luego cruzó los Alpes, parte a pie y parte a caballo, hasta llegar a la ciudad de Como, en Italia. En Milán admiró la monumental catedral y *La última cena* de Leonardo, y en Venecia, todos los tesoros artísticos que solo había visto en reproducciones y grabados. Luego viajó hasta Trieste y, a continuación, hasta Viena, donde entregó uno de sus oftalmoscopios a su amigo Brücke. En Viena coincidió con el fisiólogo Rudolf Wagner (1805-1864), de la Universidad de Gotinga, y con el químico Robert Bunsen (1811-1899), de la Universidad de Breslau, quienes también se hallaban de visita en la capital austríaca.

En su largo viaje, que duró todo el verano, Helmholtz consiguió dar a conocer su trabajo en muchas de las más importantes universidades de habla alemana y contactó con numerosos científicos. En diciembre, ya había recibido dieciocho encargos de su oftalmoscopio. Reconocido ahora como un fisiólogo y físico de prestigio, la Facultad de Medicina recomendó al ministro prusiano su promoción como profesor ordinario de Fisiología en Königsberg, plaza que ocupó a partir del 17 de diciembre de 1851. Su lección inaugural se tituló «Sobre la naturaleza de la percepción de los sentidos humanos». Cuando el año siguiente, en septiembre de 1852, nació su segundo hijo Richard, Helmholtz ya se había adentrado de lleno en la línea de investigación de la óptica fisiológica.

LA FÍSICA DEL COLOR ANTES DE HELMHOLTZ

Newton fue el primero que demostró la naturaleza heterogénea de la luz blanca al descomponerla mediante un prisma en componentes luminosas de distintos colores (sus componentes *homogéneas*). Newton observó que, cuando la luz se refracta en un medio, cada componente homogénea, o cada color, se refractaba

con un ángulo diferente. Este fenómeno se denomina *dispersión*. Cuando la luz blanca pasa por una placa de vidrio de caras paralelas, los rayos emergentes son paralelos (figura 8) y los distintos colores se superponen nuevamente. De este modo, no se observa dispersión excepto en el borde de la imagen.

Pero si la luz pasa por un prisma cuyas caras no son paralelas, los rayos emergentes no son paralelos para los diferentes colores, y la dispersión es más notable. De ahí que se usen prismas para analizar la luz en los instrumentos denominados *espectroscopios*. Si la fuente de luz es una rendija iluminada con luz blanca, la imagen de la rendija aparece como un rectángulo coloreado denominado *espectro*. El lado más cercano a la fuente es rojo, y el más alejado, violeta. Entre estos dos colores hay una secuencia de otros colores: naranja, amarillo, verde y azul. Cada uno se mezcla imperceptiblemente con el siguiente. La luz violeta es la que se dispersa en un mayor ángulo y la roja la que menos (figura 9).

FIG. 8

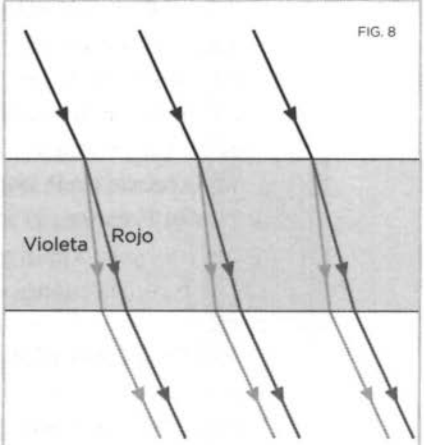


FIG. 9

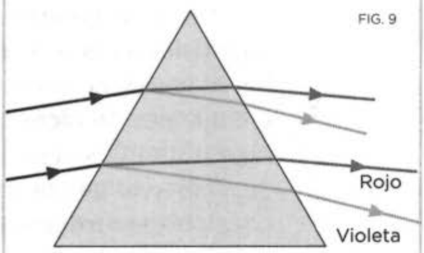


FIGURA 8:
Dispersión de la luz blanca por un cristal de caras plano-paralelas. Sus componentes salen con el mismo ángulo de entrada, vuelven a combinarse y no se dispersan.

FIGURA 9:
Dispersión de luz blanca por un prisma. Las componentes de color emergen con distintos ángulos y se dispersan.

Newton explicó que los colores de los cuerpos materiales eran debidos a peculiaridades en la absorción y reflexión de las distintas componentes de la luz y que los colores que vemos son el resultado de la acción de los rayos de luz en la retina. Los rayos rojos no son en realidad «rojos», sino que producen la sensación de «rojo». Para Newton, la luz era de naturaleza corpuscular, pero el científico inglés no adelantó ninguna hipótesis acerca de las diferencias físicas entre las distintas componentes homogéneas de la luz.

Poco después, en 1690, Huygens propuso la hipótesis de que la luz consistía en vibraciones de un medio elástico, el éter. Euler

mostró que dichas vibraciones podían explicar las teorías de Newton y dedujo que los colores simples del espectro eran luz con distintas frecuencias de vibración. El test crucial de la naturaleza ondulatoria de la luz llegó en 1816 con el descubrimiento de la interferencia de la luz por el físico inglés Thomas Young (1773-1829) y con la teoría de la interferencia de las ondas del ingeniero francés Augustin Fresnel (1788-1827).

EL ESPECTRO SOLAR

El objetivo del estudio de Helmholtz eran las sensaciones provocadas en el mecanismo visual por distintos tipos de radiación luminosa. La propiedad *color* no es en realidad una propiedad física, sino fisiológica y, a menudo, subjetiva. El estímulo físico de la luz es una cosa y la respuesta fisiológica, o sensación de luz, otra completamente distinta. La sensación de luz puede producirse por otros estímulos distintos de la luz; por ejemplo, mediante un golpe en el ojo (lo que se conoce popularmente como «ver las estrellas»); esto es así porque el nervio óptico solo transmite al cerebro la sensación de visión y no la de dolor. Las sensaciones de color son sensaciones mixtas que se pueden producir de varias formas. El mismo estímulo puede producir distintas sensaciones en diferentes partes del órgano visual. Las partes periféricas de la retina solo producen la sensación de gris y son ciegas para los colores.

Entre los físicos de la época, que ignoraban esto, existía cierta confusión. Sabían que mezclando adecuadamente luz de distintos colores se podía conseguir luz blanca. Concluían que la luz blanca era una mezcla de luz amarilla y azul claro o de luz roja, verde y azul. Pero era erróneo inferir que la sensación de blanco era una sensación compuesta de sensaciones de amarillo y azul. Por el contrario, la sensación de blanco o de gris era la más fundamental de todas las sensaciones visuales, ya que era la única sensación producida en la oscuridad, cuando los colores no se perciben. Por otro lado, no existía una relación biunívoca entre la composición de las longitudes de onda de la luz y la sensación

de color producida. El amarillo, correspondiente a una frecuencia concreta del espectro, podía ser producido por distintas mezclas de luz roja con luz verde.

Sin embargo, era posible clasificar las componentes homogéneas del espectro luminoso en función de su color, tomando como referencia la luz solar. El espectro de la luz solar visto a través de un prisma aparecía subdividido por un gran número de líneas oscuras, denominadas *líneas de Franhoufer*, debidas a la ausencia de luz de ciertas frecuencias (fenómeno causado por la absorción de luz por los distintos elementos de la corteza solar y las moléculas de la atmósfera terrestre). Joseph von Franhoufer (1787-1826) y más tarde George Gabriel Stokes (1819-1903) asignaron letras mayúsculas y minúsculas a las líneas. (La primera determinación de las longitudes de onda de los colores del espectro la realizó Young; más tarde, Franhoufer midió las longitudes de onda de las líneas negras del espectro solar.)

Helmholtz estableció una nomenclatura de los colores (figura 10). En el extremo del espectro está el rojo, sin ninguna diferencia apreciable en su tono de color hasta la línea *C*. Su representación más aproximada corresponde al bermellón. El rojo-púrpura es diferente del rojo, así como el rojo-carmín, y no están en el espectro. Solo pueden producirse mezclando los colores extremos del espectro, rojo con violeta. De la línea *C* a la *D* el rojo pasa del naranja al amarillo-dorado. Helmholtz ponía como ejemplo de naranja el minio, un mineral óxido que se emplea para preparar pintura antioxidante.

Hay una rápida transición de color desde la línea D hasta la línea b. Primero hay una estrecha franja de amarillo puro, luego otra de amarillo-

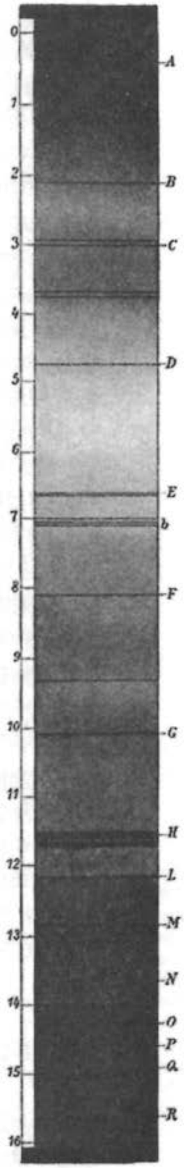


FIG. 10

verdoso y, finalmente, una de verde puro entre *E* y *b*. Helmholtz destacaba el amarillo cromo como el más parecido al amarillo puro y, para el verde, el pigmento verde de Scheele, obtenido a partir de arseniato de cobre (más tarde, cuando se utilizó para fabricar papel pintado, se descubrió que era tóxico).

Entre las líneas *E* y *F* el verde se torna verde azulado y luego azul; entre *F* y *G*, hay distintos tonos de azul. Newton observó que la porción azul del espectro es relativamente grande y asignó nombres a los distintos colores desde el azul hasta el índigo (o añil). El primer tercio del intervalo *F-G* se conoce simplemente como azul, aunque a veces se describe como azul-celeste, aunque esto es incorrecto. El tono del cielo es en realidad azul-índigo, pero su alta luminosidad lo hace parecer azul. Para evitar esta confusión Helmholtz propuso el nombre de azul-cian para describir la región del azul más próxima al verde. Los pigmentos azul de Prusia y azul ultramar corresponden a azul-cian y azul-índigo, respectivamente.

El violeta (el color de la flor del mismo nombre) es la región del espectro entre las líneas *G*, *H* y *L*. El violeta y el púrpura son los tonos en la transición gradual entre el azul y el rojo. El nombre de púrpura se usa para los tonos más rojizos de esta transición, que no están presentes en el espectro. La última región del espectro solar que se extiende desde *L* hasta *R* corresponde al ultravioleta y es invisible, a no ser que se elimine la parte del espectro visible. El ultravioleta afecta al ojo comparativamente mucho menos que la región visible entre *B* y *H*. Si estos rayos se eliminan completamente de la luz solar mediante un filtro adecuado, el ultravioleta puede verse como un color azul-índigo y, si son de mucha intensidad, gris-azulado.

LA TEORÍA DEL COLOR DE YOUNG-HELMHOLTZ

En 1801 Young presentó su teoría tricromática del color, en la que había tres colores fundamentales: rojo, verde y violeta. Cualquier otro color podía obtenerse mezclando estos tres colores en la proporción adecuada. Este modo de generar colores no podía

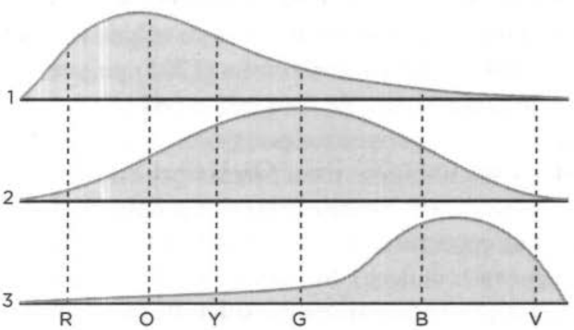
explicarse por las propiedades físicas de la luz, sino por la fisiología del ojo. Según Young, el ojo no tenía un sensor específico para cada color, sino que existían tres tipos de receptores y cada uno correspondía a uno de los colores fundamentales. En sí misma, la luz era pura energía sin color. Era el ojo el que percibía los colores gracias a sus «resonadores» específicos.

Young supuso que el ojo estaba provisto de tres tipos de fibras nerviosas. La estimulación de la primera excitaba la sensación de rojo; la estimulación de la segunda, la sensación de verde, y la estimulación de la tercera, la sensación de violeta. Helmholtz extendió la hipótesis de Young sugiriendo que la luz homogénea excitaba *simultáneamente* los tres tipos de fibras en mayor o menor medida dependiendo de su longitud de onda. Las fibras sensibles al rojo se estimulaban más por la luz de longitud de onda larga, y las fibras sensibles al violeta, por la luz de longitud de onda corta.

La teoría de Young-Helmholtz explicaba cualitativamente muchos de los fenómenos del color. Los colores del espectro se representan horizontalmente en la figura 11 en su secuencia natural, de rojo a violeta. Las tres curvas representan aproximadamente el grado de excitación o sensibilidad de los tres tipos de fibras en función de la frecuencia de la luz: la número 1 para las fibras sensibles al rojo, la número 2 para las fibras sensibles al verde y la número 3 para las fibras sensibles al violeta.

La luz roja pura estimula intensamente las fibras sensibles al rojo y muy poco los otros dos tipos de fibras, dando la sensación

FIG. 11



Curvas de excitación de color según Helmholtz. Los colores se indican con sus iniciales en inglés: *Red* (rojo), *Orange* (naranja), *Yellow* (amarillo), *Green* (verde), *Blue* (azul), *Violet* (violeta).

de rojo. La luz amarilla pura estimula moderadamente las fibras sensibles al rojo y al verde, y muy poco las sensibles al violeta, dando la sensación de amarillo. La luz verde pura estimula intensamente las fibras sensibles al verde y muy poco las otras dos, dando la sensación de verde. La luz azul pura estimula moderadamente las fibras sensibles al verde y al violeta, y muy poco las sensibles al rojo, dando la sensación de azul. La luz violeta estimula intensamente las fibras sensibles al violeta y muy débilmente las otras dos, dando la sensación de violeta. Cuando todas las fibras son estimuladas por igual se produce la sensación de blanco o gris, según la intensidad.

La hipótesis de Young no era incompatible con los conocimientos de anatomía de la época, ya que la ignorancia era total acerca del número de fibras conductoras (hoy se sabe que hay tres tipos de conos, responsables de la visión del color, que son sensibles a las longitudes de onda medias, largas y cortas). Para Helmholtz la idea esencial en la teoría de Young, y que él desarrolló y perfeccionó en su teoría del color, consistía en que las sensaciones de color eran composiciones de tres procesos en la sustancia nerviosa independientes entre sí. Esta independencia se manifestaba en los fenómenos asociados con el color.

COMBINACIONES SUSTRACTIVAS DE COLORES

En su primer artículo sobre la mezcla de colores, Helmholtz aclaró una serie confusa de observaciones cuyo origen se remontaba a las publicaciones de Newton *Opticks* (1704) y *Optical Lectures* (1729, póstumo). La teoría de Newton establecía que los colores del espectro, una vez separados por refracción en un prisma, podían volver a recombinarse para formar luz blanca. En realidad, bastaba mezclar cuatro o cinco colores fundamentales para obtener blanco (que para Newton eran el rojo, el amarillo, el verde, el azul y el púrpura o violeta). Sin embargo, el científico inglés observó que al mezclar pigmentos en polvo (o pintura) de los cinco colores nunca se obtenía blanco, sino gris.

Este problema atrajo la atención de Helmholtz cuando observó que, al mezclar luz amarilla y azul, el resultado era luz blanca. El investigador se vio sorprendido por este resultado, pues era bien conocido que la mezcla de pintura amarilla y azul ocasiona el color verde. Distinguiendo entre mezclas aditivas y mezclas sustractivas de colores, Helmholtz consiguió explicar por qué la combinación de luces y pigmentos no era equivalente. La mezcla aditiva ocurre cuando dos o más rayos de luz de distinto color (o longitud de onda) iluminan el mismo punto de la retina simultáneamente. La mezcla sustractiva ocurre cuando se mezclan los pigmentos.

Helmholtz consideró primero el problema de la mezcla de líquidos coloreados. Cuando la luz pasa a través de ellos, diversas longitudes de onda son absorbidas tras recorrer cierta distancia, mientras que otras atraviesan mayores distancias sin atenuarse apreciablemente. La luz emergente tiene el color de los rayos que menos se han absorbido. Los líquidos azules dejan pasar los rayos azules y, en menor cantidad, también los violetas y verdes, pero absorben la mayor parte de los rojos y amarillos. Los líquidos amarillos dejan pasar la mayor parte de la luz amarilla y también parte de la roja y verde, pero interceptan casi toda la azul y violeta. Cuando se mezcla un líquido azul con otro amarillo, la mezcla absorberá principalmente los colores azul, violeta, amarillo y rojo. El color resultante será, por tanto, predominantemente verde.

El mismo principio se aplica a los pigmentos en polvo, partículas semitransparentes que actúan, de modo similar a los líquidos, como filtros para la luz, reflejando parte de ella, transmitiendo otra parte y absorbiendo ciertas longitudes de onda. Cada partícula transmite la luz coloreada resultante a la capa de partículas que se halla bajo ella, y así sucesivamente. Cuando la luz blanca incide sobre este pigmento, una pequeña fracción de ella será reflejada por la capa más externa, pero la mayor parte no se reflejará hasta que haya penetrado cierta distancia en su interior. La luz que viene del interior ya no será blanca, puesto que habrá sido coloreada por la absorción.

Helmholtz comparaba este proceso con el de la luz que incide sobre una pila de cristales. Cada cristal refleja el 4% de

la luz que incide perpendicularmente y transmite el resto. Dos cristales, uno sobre el otro, reflejan aproximadamente el doble, porque la luz se refleja por la primera superficie y luego por la segunda. Por tanto, un gran número de cristales apilados reflejan casi toda la luz. Lo mismo ocurre cuando el cristal es pulverizado hasta hacerlo partículas pequeñas, pero entonces el número de reflexiones es mucho mayor debido a que se incrementa el número de superficies sobre las que incide la luz. En lo que respecta a la reflexión, lo que importa es el número de partículas y no su tamaño.

Esto explicaba también por qué cuando el pigmento se encontraba en forma de granos era más oscuro que cuando estaba pulverizado como un polvo fino. El polvo refleja más la luz, ya que está compuesto por muchas partículas semitransparentes. En los granos, la absorción de la luz es mayor porque la luz penetra hasta encontrar la siguiente superficie en la que reflejarse. Por eso los granos son más oscuros y su saturación de color es mayor.

LA CURVA DE COLORES DE HELMHOLTZ

Para observar las mezclas binarias de los colores del espectro, Helmholtz ideó una rendija en forma de V practicada en una pantalla negra, por la que hacía pasar la luz blanca antes de incidir sobre un prisma (figura 12 A). Sus dos brazos, *ab* y *bc*, estaban inclinados 45 grados a ambos lados de la vertical. Como resultado se obtenían dos espectros parcialmente superpuestos, pero rota-

Rendija en V de Helmholtz para observar la mezcla binaria de colores.

FIG. 12

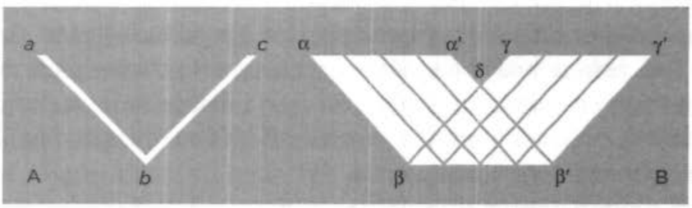
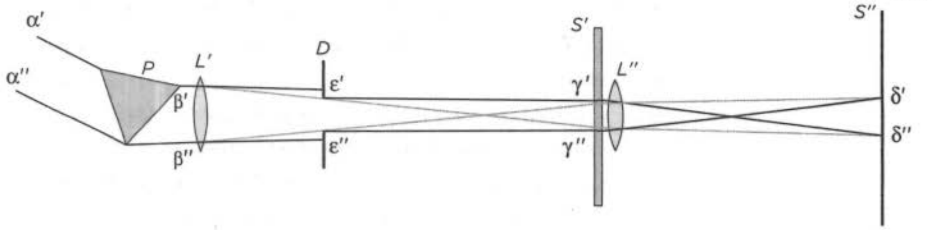


FIG. 13



Esquema del dispositivo de doble rendija de Helmholtz para mezclar colores espectrales.

dos 45 grados uno respecto al otro (figura 12 B), donde α β β' α' es el espectro de la rendija *ab*, y γ β β' γ' es el de *bc*. Todas las bandas de color del primer espectro intersecaban a las del segundo, formando un triángulo β δ β' en el que se producían todas las mezclas posibles de parejas de colores simples.

La rendija en V permitía tener una visión general de la paleta de colores binarios. Para observar en detalle la mezcla de dos colores, Helmholtz ideó un dispositivo más complicado, cuyo esquema se muestra en la figura 13. Dos haces paralelos de luz solar α' α'' se hacían pasar por un prisma *P* y luego sus espectros β' β'' eran enfocados por una lente *L*', atravesando un diafragma *D*, sobre una pantalla *S*' con dos rendijas móviles γ' y γ'', que seleccionaban dos colores del espectro. Los dos haces de luz coloreada que salían de las dos rendijas pasaban por una segunda lente *L*'' y se proyectaban uniformemente sobre una pantalla *S*'', produciendo una imagen δ' δ'' del diafragma *D* en la que los dos tipos de luz coloreada se mezclaban. La apertura del diafragma *D* debía ajustarse para que se llenara completamente por los dos haces de rayos. La cara anterior del diafragma era blanca y el haz de luz debía proyectarse en ella como un punto blanco con bordes coloreados (azul en ε' y rojo en ε'').

Con este aparato Helmholtz podía regular la anchura de las rendijas y, por tanto, la intensidad de la luz de cada color en la mezcla. Como resultado de sus experimentos, encontró siete parejas de colores complementarios cuya mezcla daba blanco, incluyendo todos los colores principales del espectro excepto el verde. También comparó las intensidades relativas de las luces de cada

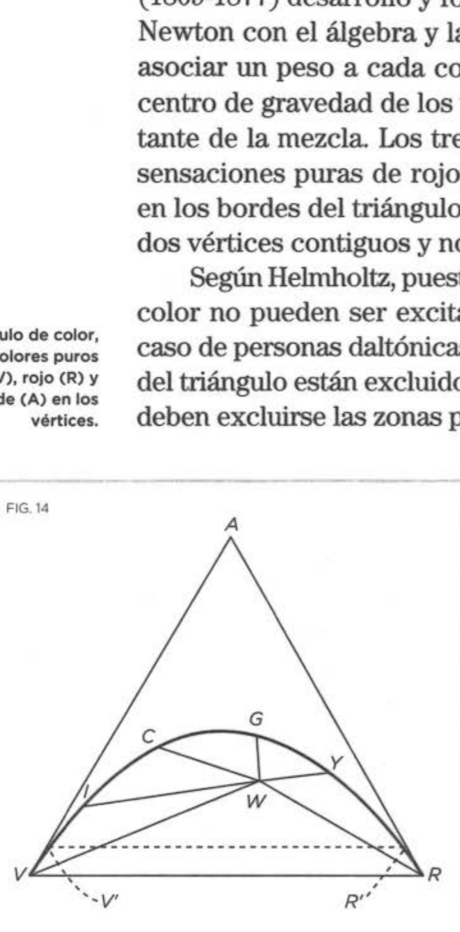
color complementario ajustando las anchuras de las correspondientes rendijas, usando sus ojos como instrumento, para determinar cuándo las sombras producidas por las dos luces parecían igualmente oscuras.

Todas las sensaciones de color, que según la teoría de Young estarían compuestas por tres estimulaciones de color distintas, podrían representarse dentro de un triángulo, de acuerdo con el sistema de los centros de gravedad de los colores ideado por Newton. En 1853 el matemático Hermann Günther Grassmann (1809-1877) desarrolló y formuló matemáticamente el método de Newton con el álgebra y la geometría de los colores. La idea era asociar un peso a cada color de acuerdo con su intensidad y el centro de gravedad de los tres pesos representaría el color resultante de la mezcla. Los tres vértices (*R*, *A*, *V*) representarían las sensaciones puras de rojo, verde y violeta (figura 14). Un punto en los bordes del triángulo sería una mezcla de los colores de los dos vértices contiguos y no del vértice opuesto.

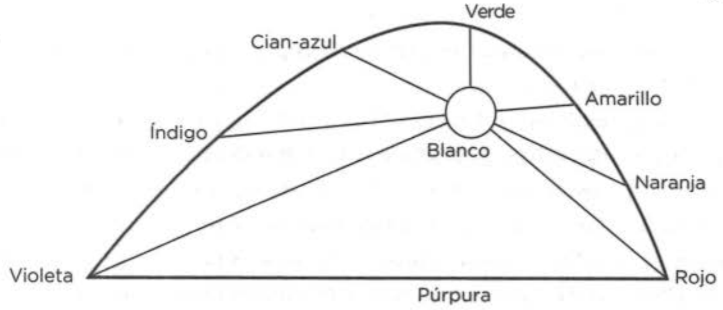
Según Helmholtz, puesto que las sensaciones puras de un único color no pueden ser excitadas por la luz externa (excepto en el caso de personas daltónicas o ciegas para los colores), los vértices del triángulo están excluidos de las sensaciones posibles. También deben excluirse las zonas próximas a los bordes y a la mitad superior del triángulo próxima al verde, ya que la excitación del verde siempre produce una excitación de rojo o violeta o ambas.

Triángulo de color, con los colores puros violeta (V), rojo (R) y verde (A) en los vértices.

FIG. 14



Del mismo modo, las posiciones del rojo *R* y violeta *V* deberían desplazarse hacia los puntos *V'* y *R'* de la figura 14. Los colores que surgen en el ojo normal por la luz externa estarían comprendidos en una región aproximadamente semicircular dentro del triángulo. La base de dicha región correspondería a la gama de colores púrpura, mezcla de rojo y violeta.



Curva baricéntrica de Helmholtz para la mezcla de colores.

Con esta representación Helmholtz explicaba por qué no se observaba ningún color complementario al verde en el espectro, contrariamente a las leyes del álgebra de los colores. Según Grassman el color complementario al verde sería el púrpura, que es mezcla de rojo y violeta y no se encuentra en el espectro. Por tanto, la curva de colores en la representación baricéntrica no era un círculo, como Newton había sugerido, sino una forma semicircular dentro de un triángulo, con el color púrpura en la base. La forma precisa de esta curva podía determinarse mediante las medidas de las intensidades relativas de los colores complementarios, que mezclados producían blanco.

El blanco no estaba situado en el centro geométrico de la figura, sino en el centro de «gravedad» pesado con las intensidades requeridas para producir blanco (figura 15). Los colores complementarios estaban situados en lados opuestos con respecto al centro de gravedad. Por ejemplo, la intensidad del azul-verdoso, o cian, debía ser el doble que la del rojo para producir blanco, por lo que el blanco debía estar el doble de lejos del rojo que del cian.

Las medidas de Helmholtz constituyeron la primera determinación cuantitativa de las intensidades relativas de los colores complementarios. Al contrario de la tradición pictórica, que simplemente clasificaba los colores como mezclas sustractivas, Hemlholtz proporcionó una representación gráfica, basada en medidas experimentales, de cómo el ojo humano mezclaba los colores aditivamente.

EL COLOR SEGÚN MAXWELL

El trabajo fundamental del físico escocés James Clerk Maxwell (1831-1879) fue la unificación de los fenómenos de la electricidad y el magnetismo en la teoría clásica del campo electromagnético, sintetizada en cuatro ecuaciones que llevan su nombre y que relacionan el campo eléctrico y el magnético con la distribución de las cargas y las corrientes en la materia. Pero su contribución al desarrollo de la ciencia cuenta con muchas más aportaciones, entre ellas cuatro artículos sobre la visión del color, publicados entre 1855 y 1860, así como uno de los primeros instrumentos de colorimetría cuantitativa.

El trabajo de Maxwell se desarrolló en paralelo al de Helmholtz. Al igual que este último, Maxwell también midió la curva baricéntrica de mezcla de colores del ojo humano. Trabajó con el álgebra de los colores de Grassman y demostró que se podían representar geométricamente en un espacio tridimensional. Maxwell caracterizó cada color mediante tres tipos de sensación: tono, saturación y claridad. Aceptó la hipótesis de Young de los tres modos de sensación de color y, en 1855, postuló, al igual que hizo Helmholtz, que las curvas de excitación de colores se solapaban. Finalmente, en 1860 midió por vez primera las formas de las tres curvas de excitación, corroborando la teoría de Young-Helmholtz.

Maxwell publicó una versión definitiva de la teoría de Young en 1855, cinco años antes que se editara el libro de Helmholtz, quien en 1860 publicó la segunda parte de su *Tratado de óptica fisiológica*. Sin embargo, Helmholtz ya había adelantado las bases de su teoría en un discurso realizado en memoria de Kant en febrero de 1855 (se trataba de una lección científica popular sobre la visión humana).

La prioridad sobre el redescubrimiento de la teoría de Young es dudosa. Aunque cronológicamente debería atribuirse a Maxwell, la teoría de Helmholtz fue más allá que la de Maxwell, dando cuenta de más fenómenos de la visión del color. Helmholtz poseía mayores conocimientos acerca de los problemas y de la fenomenología de la óptica fisiológica, mientras que Maxwell estaba

interesado sobre todo en los aspectos matemáticos de la hipótesis de Young.

LOS FENÓMENOS DE LA VISIÓN DEL COLOR

Helmholtz analizó un gran número de fenómenos que guardan relación con la visión del color. A continuación se detallan tres de ellos.

EL DALTONISMO

El daltonismo, o ceguera para los colores, podía explicarse fácilmente como la disfunción de alguno de los tres modos de la sensación de color. Helmholtz llevó a cabo sus investigaciones con un estudiante daltónico en Heidelberg. Demostró que la ausencia de la sensación del color rojo reproducía las características de la visión descritas por el sujeto. Se conocían dos clases de ceguera para el color que ya habían sido descritas por Seebeck. De acuerdo con Helmholtz, la pérdida del color rojo daría cuenta de la segunda clase, mientras que la pérdida del color verde explicaría la primera.

EL DESPLAZAMIENTO DE PURKNYE

El fenómeno del desplazamiento de colores fue descrito en 1825 por Jan Evangelista Purknye (1787-1869). La sensación de color dependía no solo de la longitud de onda, sino también de la intensidad de la luz incidente. Esto provoca que la impresión de azul predomine de noche, mientras que la de amarillo lo haga a la luz del día. Este efecto es tan familiar en la vida cotidiana que ha sido plasmado recurrentemente por los artistas en sus obras pictóricas. Cuando el pintor quiere plasmar la luz del sol radiante pinta con tonos en los que predomina el amarillo, mien-

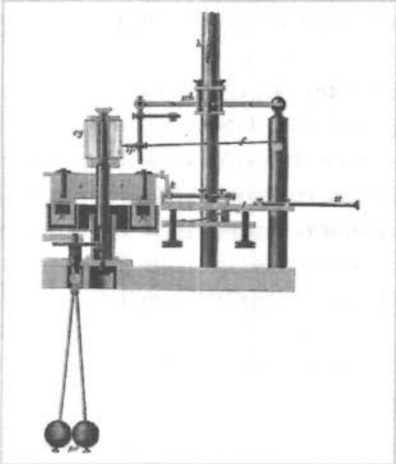
tras que en una escena nocturna se utilizan predominantemente los tonos azules.

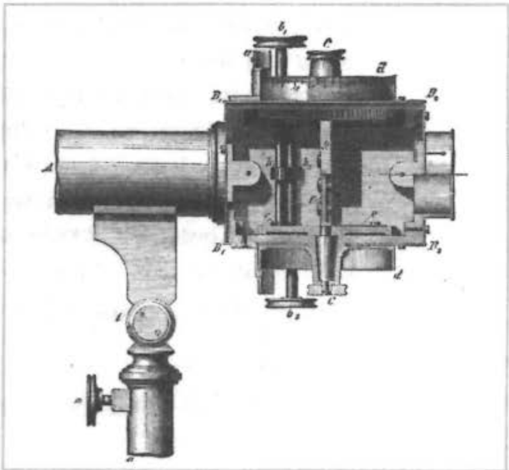
Este fenómeno fue investigado por Helmholtz y explicado en base a la teoría de Young. Su hipótesis era que, para iguales intensidades de la luz, cada uno de los tres conjuntos de nervios sensores de color rojo, verde y violeta, respondía de manera diferente. Como consecuencia, la sensación de color dependía de la intensidad de la luz. A poca intensidad de luz, la sensación de violeta es más fuerte que la sensación de verde y rojo, para la misma intensidad de luz de los tres colores. Cuando la intensidad de la luz es alta, ocurre lo contrario. La sensación de violeta es menor.

LAS POST-IMÁGENES

Las post-imágenes —un fenómeno que está considerado como accidental o patológico, o atribuible a la imaginación— nunca habían sido objeto de observación sistemática hasta los experimentos descritos por el escritor Johann Wolfgang Goethe (1749-1832) en su obra *Teoría de los colores* (1810). Goethe se había sentido impresionado por algunas observaciones accidentales de post-imágenes negativas. Cierta noche, en una posada, la sirvienta entró en su habitación; la lámpara la iluminaba y Goethe la miró fijamente: su cara era extremadamente pálida, tenía el cabello negro y vestía de rojo. Cuando ella se fue, Goethe vio en la pared que se hallaba frente a él una cara negra rodeada de un halo blanco y una clara silueta con ropas de color verde mar. Tal visión le condujo a realizar una serie de observaciones sistemáticas de post-imágenes que le permitieron establecer que el negro evoca el blanco y que los colores rojo, naranja y violeta evocan a sus complementarios, respectivamente, verde, azul y amarillo, y viceversa. Goethe dispuso estos datos en un *círculo de colores* a partir del cual se podían predecir los colores complementarios.

Helmholtz comprendió que las post-imágenes tenían su origen en las variaciones de la sensibilidad del ojo. Después de que la luz actúa en la retina, el mecanismo nervioso de la visión continúa en un estado de excitación durante un tiempo. La persistencia de





28 ANATOMISCHE BESCHREIBUNG DES AUGES. §. 7.

In der Augenhöhle liegen ferner sechs zur Bewegung des Augapfels bestimmte Muskeln, nämlich

1) der innere gerade *i* und

2) der äussere gerade *a*. Beide entspringen am Umfange des *Foramen opticum* in der Spitze der Augenhöhle, und setzen sich an die innere und äussere Seite des Augapfels. Sie drehen ihn um seine verticale Axe.

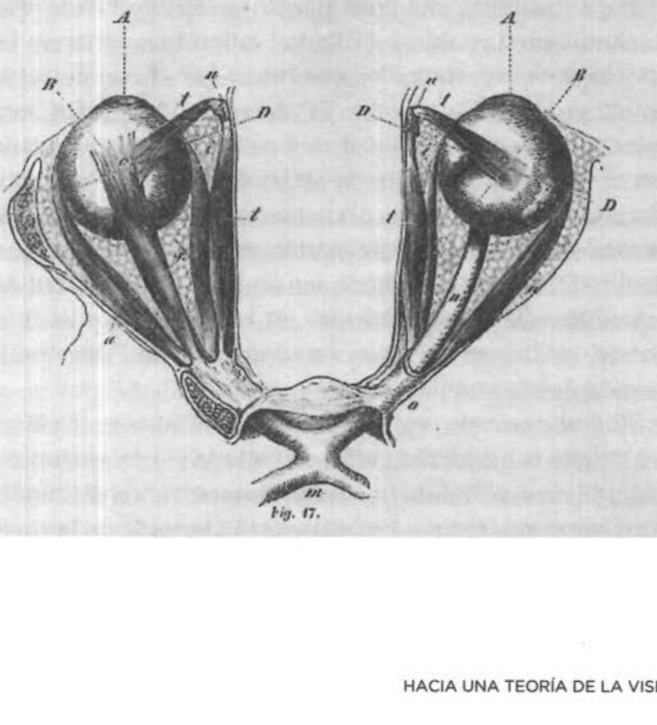


Fig. 17.

FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
Miógrafo de Helmholtz según el grabado aparecido en *Physiologische Graphik*, libro publicado en Leipzig en 1891.

FOTO SUPERIOR DERECHA:
El oftalmómetro de Helmholt en un grabado perteneciente a la tercera edición de su *Tratado de óptica fisiológica*, publicado en 1909 en Hamburgo.

FOTO INFERIOR:
Fragmento de una página del *Tratado de óptica fisiológica* perteneciente a la edición de Leipzig de 1867.

la impresión luminosa es fácil de comprobar mirando fijamente una luz brillante, y luego apartando la vista hacia una zona oscura. Seguiremos viendo la luz brillante como una post-imagen por excitación de la retina. Pero hay un segundo efecto notorio: cualquier parte de la retina sobre la que haya actuado una luz brillante reacciona ante una nueva luz de forma distinta a las otras partes de la retina que no han sido afectadas previamente.

«Las sensaciones de los sentidos son señales para nuestra conciencia. Corresponde a nuestra inteligencia aprender a comprender su significado.»

— Hermann von Helmholtz.

Helmholtz distinguía entre dos tipos de post-imágenes: las positivas y las negativas. Las positivas son aquellas en las que las partes brillantes aparecen brillantes y las partes oscuras aparecen oscuras. Por el contrario, en las negativas las partes brillantes aparecen oscuras, y las oscuras, brillantes, como en un negativo fotográfico. Si la imagen tiene colores, los colores de la post-imagen negativa son los complementarios.

Para visualizar una post-imagen positiva, el observador debe colocarse ante un objeto brillante, como una ventana, cerrar los ojos y tapárselos con las manos hasta que el campo visual quede libre de cualquier impresión luminosa anterior. Entonces, apartando las manos, tiene que abrir y cerrar los ojos rápidamente. La post-imagen se debe a que la estimulación de la retina por la luz se incrementa durante los primeros momentos de su acción, hasta alcanzar su máximo, aproximadamente en un tercio de segundo. Si la iluminación dura más de ese tiempo, la intensidad de la post-imagen disminuye rápidamente. Si, mientras la post-imagen aún persiste, se dirigen los ojos cerrados hacia una zona brillante, entonces aparece una post-imagen negativa.

El fenómeno fue explicado por Helmholtz en base a que después de que la luz ha actuado sobre el ojo (1), la estimulación continúa y (2) la sensibilidad a los nuevos estímulos disminuye, lo que se conoce como *fatiga*. La fatiga es la causante de las post-imáge-

nes negativas. Al fijar la vista en un objeto brillante, esa porción de la retina se fatiga y no será capaz de reaccionar a un segundo estímulo luminoso; entonces la post-imagen será negativa porque solo reaccionan a la luz las zonas de la retina que rodean a la zona fatigada. Si el objeto es rojo, según la teoría de Young-Helmholtz, se fatigarán las terminaciones nerviosas sensibles al rojo. Una segunda luz excitará, por tanto, la sensación de los otros dos colores que no han sido fatigados; en este caso, una mezcla de azul y verde o cian, que es el color complementario del rojo.

EL «TRATADO DE ÓPTICA FISIOLÓGICA» Y LA TEORÍA EMPÍRICA DE LA PERCEPCIÓN

Helmholtz comenzó a escribir su obra por sugerencia de su amigo Gustav Karsten (1820-1900), que estaba preparando una enciclopedia de física. Lo que iba a ser un tratado de óptica, se convirtió en una obra de más de mil páginas, en tres volúmenes, que tardó más de diez años en escribir, y que constituyó una valiosa recopilación de sus investigaciones y las de sus contemporáneos. El manual es abundante en demostraciones matemáticas, ejemplos prácticos y explicaciones detalladas de sus experimentos y el instrumental científico utilizado.

La primera parte, sobre la dióptrica del ojo, se publicó en 1856, inmediatamente después de la llegada de Helmholtz a Bonn. Contenía la descripción de la fisiología del ojo, la teoría de la óptica geométrica y multitud de resultados obtenidos usando el oftalmoscopio y el oftalmómetro. La segunda parte se publicó en 1860, cuando Helmholtz estaba en Heidelberg, y trataba sobre las sensaciones de la visión, la respuesta visual a la luz, los colores simples y compuestos, la intensidad y la duración de la sensación visual, las post-imágenes y el contraste. Aquí se describía en su totalidad la teoría de Young-Helmholtz. La tercera parte, publicada en 1866, era la más extensa y trataba sobre la percepción visual del espacio. En ella Helmholtz estableció las bases de su teoría de la percepción exponiendo una completa metodología científica que fue esencial para el desarrollo poste-

rior de la psicología. En este volumen se investigaban en detalle todos los factores relevantes en la percepción visual, tales como los movimientos de los ojos, el campo de visión monocular, la percepción de la profundidad, la visión binocular y la oposición entre los dos ojos.

Las sensaciones provocadas por la luz en el mecanismo nervioso de la visión nos permiten formar concepciones con respecto a la existencia, la forma y la posición de los objetos externos. Estas ideas se denominan *percepciones visuales*. La teoría de la percepción fue el resultado de analizar científicamente las condiciones que daban lugar a las percepciones visuales. Puesto que tales percepciones son ideas o actividades de nuestra mente, la teoría de la percepción pertenece al dominio de la psicología. Sin embargo, la ciencia de la percepción abarcaba también tanto la física como la fisiología, ya que se trataba de determinar qué propiedades de los estímulos físicos y de las estimulaciones fisiológicas eran responsables de la formación de tal o cual idea sobre la naturaleza de los objetos externos que percibimos.

CAPÍTULO 3

La percepción del sonido y la música

Los trabajos pioneros de Helmholtz sobre acústica fisiológica y musicología completaron su gran teoría de la percepción. En sus experimentos sonoros analizó los espectros de los instrumentos musicales aplicando las series de Fourier. Utilizando resonadores, sirenas polifónicas, sintetizadores y analizadores de sonido de su invención, desarrolló teorías sobre la combinación de tonos, la consonancia y la disonancia, y la cualidad auditiva.

Los inicios de 1853 fueron difíciles para Helmholtz. Su esposa Olga había caído enferma a causa de una gastritis nerviosa, de la que se recuperó tras varias semanas de cuidados constantes por parte de su madre y de su hermana. Además, la madre de Helmholtz guardaba cama después de someterse a una seria operación. Él mismo sufría de frecuentes ataques de migraña, durante los cuales le era imposible trabajar.

En agosto, se dispuso a emprender su primer viaje a Inglaterra. Como había hecho el año anterior, llevó a su mujer y a sus dos hijos a Dahlem. En Berlín visitó a Müller y asistió a una cena invitado por Magnus, su antiguo profesor de Física en la universidad, donde conoció a Tyndall, el traductor al inglés de su trabajo sobre la conservación de la energía, que le recomendó un buen hotel en Londres. Provisto de tres cartas de presentación redactadas por prestigiosos profesores de la Universidad de Berlín, Helmholtz contactó en la capital inglesa con importantes científicos británicos. Conoció al primer físico de Inglaterra y Europa, Michael Faraday (1791-1867), que le mostró su laboratorio; al físico Charles Wheatstone (1802-1875), inventor del primer telégrafo eléctrico, y al astrónomo George Biddell Airy (1801-1892), que le llevó a su observatorio y tuvo la cortesía de invitarlo a su casa.

Desde Londres viajó a Hull, en Yorkshire, para asistir a la reunión anual de la Sociedad Británica de Ciencias. Aparte de Helm-

holtz, los únicos extranjeros eran el profesor Julius Plücker de Bonn y un científico ruso. Había 850 asistentes, entre los cuales 236 eran mujeres. Este dato llamó la atención de Helmholtz, que escribió a su mujer que «las señoras aquí en Inglaterra parecen estar muy versadas en ciencias, aunque muchas de ellas vienen a exhibirse o por curiosidad». Hermann era mencionado como «el profesor Helmholtz de Königsberg, que ha contribuido a uno de los más importantes avances científicos». Se referían a su *conservación de la energía*, que parecía ser más conocida en Inglaterra que en Alemania. En una de las sesiones paralelas de la sección de física, Helmholtz leyó su trabajo «Sobre la mezcla de los colores». Aunque su inglés era imperfecto, tras su intervención recibió amplias felicitaciones. Su primera experiencia inglesa fue muy satisfactoria y, a lo largo de su vida, el científico volvió a Gran Bretaña siempre que pudo.

DE KÖNIGSBERG A BONN

En aquella ocasión, Helmholtz tuvo que regresar a Königsberg antes de lo previsto, ya que recibió la noticia de que Olga había vuelto a caer enferma. Aunque se recuperó en pocos días, sus recaídas eran cada vez más frecuentes. Poco después, Helmholtz fue elegido decano de la Facultad de Medicina. Así, cuando en el verano de 1854 el rey de Prusia visitó la ciudad, Helmholtz participó en los actos oficiales de recepción, banquete y despedida. En función de su nuevo cargo, durante tres días tuvo que vestir con un manto escarlata.

El 1 de octubre de 1854 recibió la noticia de la súbita muerte de su madre. Le fue imposible llegar a tiempo para su funeral. Aparte de Helmholtz, su padre quedaba en compañía de dos hijas y de su hijo menor. La hija mayor, Marie, nacida en 1823, quería haber sido artista, pero tuvo que renunciar a ello por problemas de visión. Pronto deseó independizarse y viajó con la familia del conde Bareschnikow a Rusia, de donde nunca regresó; murió en diciembre de 1867. La hija menor, Julie, nacida en 1827, permane-

ció en Potsdam al cuidado de su padre, aunque pasó largas temporadas en casa de su hermano Hermann; murió de un ataque de apoplejía en julio de 1894. El hijo menor, Otto, nacido en 1834, se convirtió en un renombrado ingeniero metalúrgico y estuvo siempre muy unido a su hermano Hermann.

Transcurridos cinco años desde su llegada a Königsberg, Helmholtz había realizado espléndidos logros en distintas ramas de la ciencia. En aquella época el genio del infatigable investigador estaba en pleno desarrollo. A pesar de los escasos recursos, se las ingeniaba para construir prototipos de sus instrumentos ópticos utilizando rulos de su esposa, bloques de juguete de sus hijos, cera y trozos de cuerda. Esto solía bastar para comprobar si los resultados iban a ser los esperados antes de construir el instrumento definitivo.

«Préstame tus ojos media hora y serás digna de participar en mis experimentos ópticos.»

— Helmholtz a su esposa Olga.

Olga fue siempre una valiosa ayuda. Trabajó y escribió para Helmholtz, quien solía leer en voz alta las lecciones que iba a publicar para que ella juzgara cómo podían ser recibidas por el público. Pero su salud era cada vez peor. Desde el nacimiento de su hijo sufría de tos y los médicos pensaban que el frío clima de Königsberg podía ser la causa de su enfermedad. Por esta razón, cuando quedó vacante en Bonn la plaza de profesor de Anatomía y Fisiología, Helmholtz no dudó en solicitar el traslado, a pesar de que ello implicaba que tuviera que dedicar la mayor parte de sus lecciones a la anatomía. En marzo de 1855 se anunció la adscripción de Helmholtz para el puesto de Bonn.

En julio recibió una carta de William Thomson, que se encontraba por motivos de salud en el balneario de la ciudad de Kreuznach, en el Palatinado, junto con su mujer. Thomson le invitaba a asistir a la reunión de la Sociedad Británica en septiembre y lamentaba no haber estado presente en la reunión de Hull celebrada dos años atrás, ya que había deseado encontrarse con él desde que leyó su trabajo sobre la conservación de la energía.

Helmholtz decidió reunirse con Thomson. El primer encuentro de los dos hombres que llegarían a ser los más importantes científicos de Inglaterra y Alemania tuvo lugar en Kreuznach el 6 de agosto de 1855. Helmholtz, que esperaba que Thomson fuera algo más viejo que él, no salió de su asombro al descubrir a un hombre joven y bien parecido. La esposa de Thomson solo los acompañó en breves momentos; era una joven encantadora e intelectual, aunque de aspecto enfermizo. Thomson superaba en inteligencia y lucidez a todos los grandes científicos a los que Helmholtz conocía. Durante dos días discutieron sobre las teorías del calor y la conservación de la energía. La amistad y estima mutua conectó a estos dos grandes hombres durante casi cuarenta años.

A mediados de septiembre de 1855 los Helmholtz se mudaron a Bonn. El clima era considerablemente mejor que el de Königsberg y Olga dejó de toser en cuanto llegó. Las lecciones de anatomía que debía dar Hermann le presentaron algunas dificultades durante el primer semestre, pero sus alumnos se mostraban satisfechos. Sin embargo, en abril de 1856, Du Bois-Reymond fue informado por Lehnert, una autoridad del ministerio, de un incidente relacionado con las clases de Helmholtz. Alguien había escrito al ministro quejándose de que sus lecciones de anatomía habían sido inadecuadas. Du Bois-Reymond replicó a Lehnert que «aunque todas las cosas son posibles, y la estupidez probable, eso era, no solo improbable, sino imposible». Tras informar a Helmholtz sobre el asunto, este le contestó que aquello era una exageración de los hechos, que se reducían a que había explicado algo de fisiología y química en sus clases de anatomía, y que una vez había escrito un coseno en clase de óptica fisiológica. Helmholtz terminaba la carta lanzando «mis sinceras felicitaciones al filósofo nauseabundo que te ha metido en esto y que, sin duda, estará ocupado con cuestiones tan difíciles como la formación de los conceptos de espacio y tiempo, de los que sabrá ahora más que todos los fisiólogos del mundo».

Una vez asentado en Bonn, Helmholtz dirigió su atención al campo de la acústica fisiológica y encargó construir una sirena polifónica para comenzar sus experimentos. Su interés era extender su teoría de la percepción al sentido del oído, con la intención de

WILLIAM THOMSON (LORD KELVIN) (1824-1907)

Thomson fue una figura cumbre de la ciencia británica de la segunda mitad del siglo XIX, consolidando la física matemática. Nació en Belfast y era hijo de un profesor de Matemáticas que en 1832 se trasladó a la Universidad de Glasgow. En 1845 se graduó en la Universidad de Cambrigde. En 1846 se hizo cargo de la cátedra de Filosofía Natural en Glasgow, plaza que ocupó hasta su jubilación en 1899. Thomson aplicó a la física los métodos de los matemáticos franceses; formalizó el concepto matemático de campo e introdujo la escala absoluta de temperatura que lleva su nombre (grados Kelvin). Reconcilió la teoría del calor de Carnot con los trabajos de Joule. En la década de 1850, acuñó el término «termodinámica» y caracterizó la transferencia de calor desde los cuerpos calientes a los fríos como una ley fundamental de la naturaleza (la segunda ley de la termodinámica).



Lord Kelvin posando junto a su brújula marina. La fotografía está datada hacia el año 1900.

Intereses multidisciplinares

Thomson desarrolló una teoría de la materia con interacciones mecánicas a través del éter —en la que los átomos eran vórtices de un fluido—, que entró en conflicto con la teoría electromagnética de James Clerk Maxwell. En la década de 1890 reconoció que su teoría atómica de vórtices era impracticable, pero nunca aceptó la teoría de Maxwell. Thomson calculó la edad de la Tierra y el Sol, aunque obtuvo un valor mucho menor que el requerido por las teorías geológicas y naturalistas, y se convirtió en un oponente de la teoría de la evolución de Charles Darwin (1809-1882). Estudió los problemas teóricos y prácticos de la nueva telegrafía eléctrica y estuvo involucrado en el establecimiento de la primera línea de telegrafía transatlántica, en 1866. Thomson se dedicó también a definir los estándares eléctricos, así como al negocio de la construcción de instrumentos de medida.

reducir las leyes de la armonía musical a los elementos básicos más simples posibles y encontrar una explicación científica para la consonancia y la disonancia de los tonos musicales.

PROFESOR DE FISIOLOGÍA EN HEIDELBERG

Apenas transcurridos dos años desde su llegada a Bonn, Helmholtz recibió una proposición que le llevaría de nuevo a cambiar de residencia. En abril de 1857 Bunsen le escribió desde Heidelberg anunciándole que el ministro de Baden deseaba contratar un buen fisiólogo para la cátedra de Fisiología; se le invitaba a indicar su salario y las condiciones bajo las cuales aceptaría el puesto. Tras exponer el caso ante las autoridades de Bonn, estas consideraron que no debían permitir la marcha de Helmholtz y le concedieron un importante aumento de sueldo; se comprometieron asimismo a reformar el edificio de anatomía y dotarlo de un nuevo laboratorio. Helmholtz valoró la contraoferta y decidió permanecer en la universidad en la que estaba impartiendo clases.

En diciembre de 1857 Bunsen le volvió a escribir para que reconsiderara la oferta que había recibido de la Universidad de Heidelberg, dado que la construcción del nuevo laboratorio en Bonn había sido pospuesta. Aconsejado por su padre, que le hizo ver que el puesto de Heidelberg era más apropiado para sus intereses científicos, y dado que no recibió noticia alguna sobre la reforma del edificio de anatomía, finalmente aceptó la invitación en febrero de 1858.

Sin embargo, Helmholtz se vio obligado a posponer su traslado a Heidelberg hasta el otoño. El 28 de abril Du Bois-Reymond le anunciaba la muerte de Johannes Müller y le informaba de que el príncipe de Prusia se había interesado por sus razones para dejar la Universidad de Bonn. Asimismo, le comentaba la intención del príncipe de viajar a Baden con el objeto de liberar a Helmholtz de su recién firmado contrato. De este modo, podría entablar nuevas relaciones con el Gobierno prusiano y permanecer en Bonn disfrutando de las mismas condiciones que le ofrecían en Heidelberg. Sin embargo, Helmholtz no cambió de idea, y en septiembre de 1858 tomó posesión de su nuevo puesto en Heidelberg, donde, junto con Bunsen y Kirchhoff, se inauguró una era de excelencia que difícilmente alcanzaría otra universidad en el siglo XIX.

RECONOCIMIENTO INTERNACIONAL Y DESGRACIAS FAMILIARES

El inicio de la estancia de Helmholtz en Heidelberg coincidió con su reconocimiento internacional. En noviembre fue elegido miembro correspondiente de la Academia de Ciencias en Múnich, en diciembre recibió la Orden del León Holandés y el profesor Donders, que dirigía el nuevo hospital de Utrecht para enfermedades oculares, celebró el descubrimiento del oftalmoscopio en la ceremonia inaugural.

Mientras Helmholtz finalizaba el segundo volumen de su tratado de óptica fisiológica, sus investigaciones en acústica también recibieron un inmediato reconocimiento por parte del mundo científico. En abril de 1859 asistió al festival de la Academia de Ciencias de Baviera y pronunció una conferencia sobre la cualidad del sonido de las vocales. En junio finalizó el estudio del movimiento del aire en tubos abiertos, uno de sus trabajos más importantes en el ámbito de la física matemática, en el que resolvió el problema del movimiento de los vórtices, una antigua cuestión que físicos y matemáticos habían atacado en vano desde los tiempos de Euler. Ese mismo año fue nombrado miembro correspondiente de la Academia de Ciencias de Viena y de la Sociedad Científica de Erlangen.

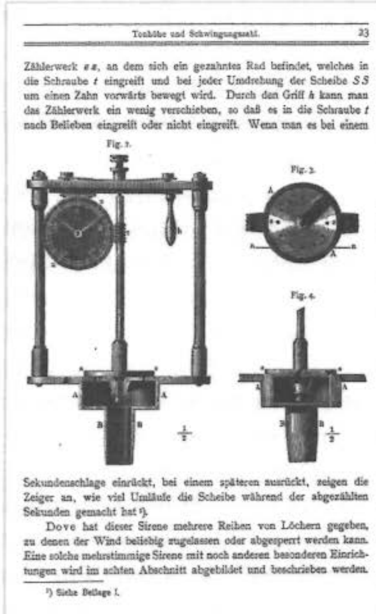
Sin embargo, en 1859 Helmholtz tuvo que afrontar la muerte de las dos personas más cercanas a él. El 4 de junio recibió la noticia de que su padre había sufrido un infarto; cuando llegó a Potsdam su padre ya había fallecido. A su regreso del funeral no encontró gran consuelo en su casa, ya que la salud de Olga iba empeorando irrevocablemente. Hermann acusó severamente esta situación, y sus ataques de migraña eran cada vez más intensos. Su continua preocupación y ansiedad menguaron gradualmente su capacidad de trabajo. Sus parientes le ayudaron haciéndose cargo de sus hijos y del cuidado constante de la enferma. La hermana de Olga estuvo con ella hasta el final. Murió el 28 de diciembre de 1859. La inscripción de su lápida en el cementerio de Heidelberg reza: «Bendita sea la exquisita semilla que el amor esparce a su alrededor».

LA REFORMA DE LA ACÚSTICA FISIOLÓGICA

Helmholtz había iniciado sus estudios acústicos en 1855 con la idea de producir una obra a gran escala, como había hecho con la óptica fisiológica. La esencia de su proyecto de investigación era el estudio de la consonancia y disonancia de los tonos basándose en los *batidos* acústicos que se generan al interferir entre sí dos ondas sonoras con frecuencia ligeramente distinta. Había concebido la idea de que la calidad del tono dependía de la serie de armónicos. Su teoría de la audición se basaba en la hipótesis de que cada tono de una frecuencia específica era sentido por una fibra nerviosa individual que estaba conectada con un resonador de la frecuencia correspondiente. En definitiva, su intención no era realizar una mera contribución a la acústica fisiológica, sino llevar a cabo una renovación fundamental de esta materia, tal y como había hecho en óptica.

Helmholtz solo necesitó catorce meses (de octubre de 1855 a enero de 1857) para concebir las ideas fundamentales de su proyecto, pero le hicieron falta casi ocho años (los transcurridos entre 1855 y 1863) para desarrollarlo en detalle y publicar sus resultados. Varias fueron las razones de este lento desarrollo. En primer lugar, trabajaba simultáneamente en su *Tratado de óptica fisiológica*. En segundo lugar, durante esos años también publicó sus artículos sobre fisiología del músculo e hidrodinámica. En tercer lugar, el tiempo que podía dedicar a su investigación se veía reducido por sus obligaciones académicas; además, se tuvo que mudar a Heidelberg, donde montó primero un laboratorio provisional y luego se trasladó a un nuevo edificio. Finalmente, tuvo que esperar a la fabricación de los instrumentos científicos que necesitaba para realizar sus experimentos. La dotación para la compra de materiales era reducida tanto en Bonn como en Heidelberg, y se requería tiempo para construir instrumentos de nuevo diseño. La situación cambió considerablemente cuando el rey de Baviera realizó una donación para que pudiera desarrollar sus investigaciones acústicas. Con ese dinero encargó la fabricación del primer sintetizador eléctrico que «cantaba» las vocales gracias a una serie de diapasones.





Tonhöhe und Schwingungszahl. 23

Zählerwerk *z z*, an dem sich ein gezahntes Rad befindet, welches in die Schraube *t* eingreift und bei jeder Umdrehung der Scheibe *S S* um einen Zahn vorwärts bewegt wird. Durch den Griff *h* kann man das Zählerwerk ein wenig verschieben, so daß es in die Schraube *t* nach Belieben eingreift oder nicht eingreift. Wenn man es bei einem

Fig. 1. Fig. 3. Fig. 4.

Sekundenschlage einrückt, bei einem späteren ausrückt, zeigen die Zeiger an, wie viel Umläufe die Scheibe während der abgezählten Sekunden gemacht hat [1].

Dove hat dieser Sirene mehrere Reihen von Löchern gegeben, zu denen der Wind beliebig zugelassen oder abgesperrt werden kann. Eine solche mehrstimmige Sirene mit noch anderen besonderen Einrichtungen wird im achten Abschnitt abgebildet und beschrieben werden.

[1]) Siehe Beilage I.

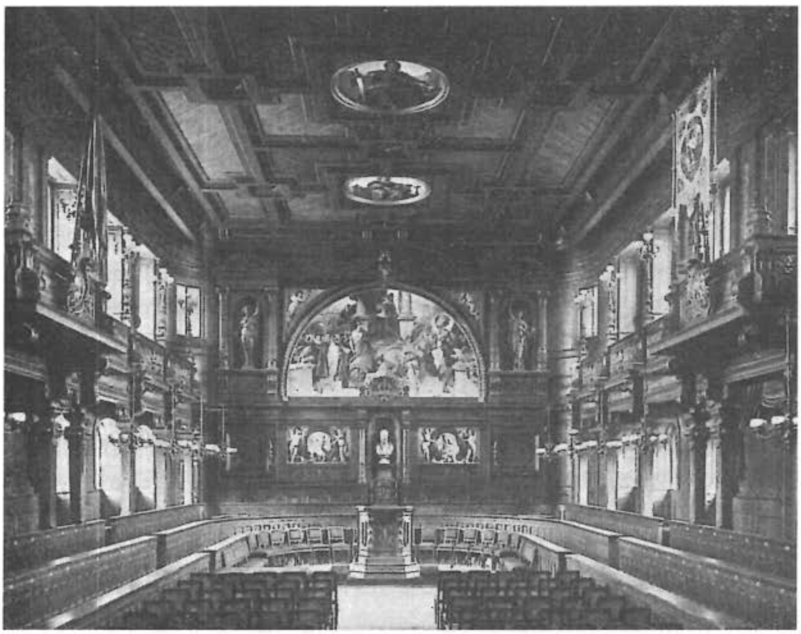


FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
Retrato de Helmholtz extraído del número de junio de 1874 de la revista estadounidense *Popular Science Monthly*.

FOTO SUPERIOR DERECHA:
Página perteneciente a *Sobre las sensaciones del tono como una base fisiológica de la teoría de la música* en una edición de 1913.

FOTO INFERIOR:
La Alte Aule, el auditorio de la Universidad de Heidelberg en una fotografía tomada en 1896. Helmholtz dio clases en esta institución durante más de una década.

LAS SENSACIONES DEL TONO

En su libro *Sobre las sensaciones del tono como una base fisiológica de la teoría de la música*, Helmholtz conectó la frontera de dos ciencias: por un lado, la acústica física y fisiológica; por otro, la ciencia y la estética musicales. La obra iba dirigida a lectores con distinta formación e intereses. Hasta entonces la conexión entre acústica y música había sido meramente superficial. Mientras que en la acústica se empleaban términos prestados de la teoría de la armonía, como *escala*, *intervalos* y *consonancias*, los manuales de música solían comenzar con un capítulo de física que hablaba de *frecuencia* de las vibraciones y fijaba sus cocientes en los intervalos musicales. Daba la impresión de que debía existir una relación entre la acústica y la música, pero no se especificaba su naturaleza. Aunque los conocimientos de física habían sido útiles para los fabricantes de instrumentos, fueron infructuosos para el desarrollo de la teoría de la armonía.

Sin embargo, los hechos esenciales para la teoría de Helmholtz se conocían desde tiempos remotos. Ya en el siglo VI a.C. Pitágoras sabía que, cuando dos cuerdas iguales sometidas a la misma tensión se tocaban al unísono, había consonancia entre los dos sonidos si la relación entre sus longitudes era 1/2, 2/3 o 3/4, lo que correspondía a los intervalos de octava, quinta y cuarta musicales (como las notas do-do', do-sol y do-fa tocadas al unísono), respectivamente. Más tarde, la física extendió las leyes pitagóricas de las longitudes de las cuerdas a la frecuencia de las vibraciones, pudiéndose aplicar a los tonos de todos los instrumentos musicales, y se añadieron las relaciones numéricas 4/5 y 5/6 para los sonidos consonantes, menos perfectos, de la tercera mayor y menor (como las notas do-mi y la-do). Pero la física no había dado ningún paso que realmente explicara la relación entre la consonancia musical y los cocientes de los primeros seis números. La creencia general era que, de alguna manera, la mente humana estaba constituida para descubrir la relación numérica de las vibraciones musicales y encontraba un placer peculiar al contemplar las relaciones más simples.

Al contrario que otras artes, la música está en estrecha relación con *la sensación pura*. En las artes plásticas o en la poesía se

evocan imágenes a través de los ojos o el oído, en un proceso en el que interviene la memoria o la imaginación, provocando placer en el espectador. Solo en la pintura podemos encontrar, en el color, un elemento que se aprecia directamente por los sentidos, sin ninguna intervención del intelecto. Sin embargo, con las sensaciones de la música no creamos ninguna imagen mental. Cuando escuchamos un concierto, reconocemos una nota del violín y otra del clarinete, pero nuestro goce no depende de nuestra concepción de un violín o un clarinete, sino del tono que producen, mientras que el disfrute artístico de una estatua de mármol no depende de la luz blanca que se refleja dentro del ojo, sino de la belleza de la imagen que evoca en la mente.

> «El material del arte de la música son las sensaciones de las notas.»
>
> — Hermann von Helmholtz.

Esta conexión de la música con la sensación pura llevó a pensar a Helmholtz que debía de existir una importante relación entre la teoría de la sensación del oído y la estética musical; mucho más importante que, por ejemplo, la relación entre la perspectiva y la pintura. La teoría de la sensación del oído pertenece, en primer lugar, a la acústica fisiológica, aunque las investigaciones sobre el sentido del oído involucran, como en el caso del sentido de la vista, a la física, la fisiología y la psicología: la primera se encarga de estudiar cómo el sonido excita los nervios; la segunda, la forma en que las excitaciones nerviosas producen las distintas sensaciones, y la tercera, cómo las sensaciones resultan en percepciones mentales. Los sentidos involucran, por tanto, excitación, sensación y percepción.

Sin embargo, solo se había tratado en profundidad la parte física de la teoría del sonido. Las investigaciones se referían exclusivamente al movimiento de los cuerpos cuando producían el sonido que el oído apreciaba. La acústica física no era más que una parte de la teoría del movimiento vibratorio de los cuerpos elásticos. El fenómeno de la audición no era el objeto principal de los estudios de acústica física.

Cuando Helmholtz inició sus investigaciones, se tenían ciertos conocimientos sobre la conducción del sonido desde el oído externo hasta el laberinto del oído interno. Johannes Müller fue el primero que estudió estos temas en Alemania. En *Las sensaciones del tono*, Helmholtz recopiló y ordenó todo el material existente, añadiendo resultados de sus propias investigaciones. El científico llevó a sus últimas consecuencias las teorías ya conocidas, desarrollando nuevos instrumentos que utilizó en sus observaciones y construyendo una teoría de la audición coherente y compacta.

TONO MUSICAL Y FRECUENCIA

Los cuerpos que suenan se encuentran en un estado de vibración. Esta vibración es comunicada al aire y genera sonido. Una nota o tono musical es un sonido producido por rápidos impulsos que se repiten con perfecta regularidad en tiempos iguales. Las agitaciones irregulares del aire solo generan ruido. La altura o frecuencia de una nota musical depende del número de vibraciones por segundo. Cuantas más vibraciones se produzcan, más agudo será el tono. Si el número de vibraciones se reduce, el sonido se hace más grave. Dos notas distintas sonando al unísono forman un *intervalo* musical. Existe una estrecha relación entre los intervalos musicales que resultan armoniosos al oído y el cociente entre las frecuencias de las notas que los forman. Si una de las notas realiza el doble de vibraciones que la otra en el mismo tiempo, la relación entre sus frecuencias es de 1/2 y el intervalo se denomina *octava;* si es de 2/3 es un intervalo de *quinta;* si es de 4/5 las dos notas forman un intervalo de *tercera mayor*.

En acústica, es más conveniente utilizar la notación musical alfabética anglosajona, donde las siete notas de la escala mayor (do, re, mi, fa, so, la, si) se denominan con las letras *c*, *d*, *e*, *f*, *g*, *a*, *b*, respectivamente. Por ejemplo, una octava corresponde en un piano a los sonidos de la nota *c*, situada en el centro del teclado, y del siguiente *c* más agudo. Es común añadir una comilla simple al

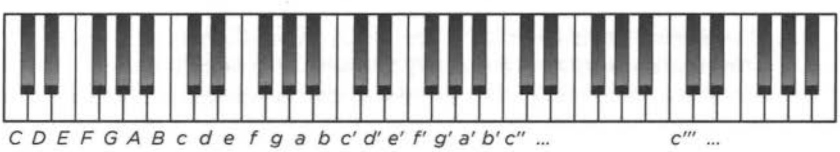
símbolo de una nota para indicar la octava. Así, el intervalo de octava estaría compuesto por las notas *cc*'. La octava de *c*' se denota con dos comillas, *c*'', y así sucesivamente. Un intervalo de quinta puede formarse con las notas *c* y *g* (es decir, que la relación entre las frecuencias de *c* y *g* es 2/3) y un intervalo de tercera mayor con las notas *c* y *e* (su relación es 4/5). Las notas que están una octava por debajo se denotan con letras mayúsculas, *C*, *D*, *E*, *F*, *G*, *A*, *B*. Si se baja otra octava, se vuelve a añadir una comilla, *C*', ..., *B*', etc. La figura 1 muestra la ubicación de las notas en el teclado.

El acorde de *do mayor* contiene las cuatro notas *C*-*E*-*G*-*c*, y la relación entre sus frecuencias es 4:5:6:8. El resto de las relaciones entre las notas musicales de la escala pueden obtenerse imaginando un nuevo acorde mayor construido a partir de las notas anteriores. El número de vibraciones se hace el doble cada vez que subimos una octava. Por tanto, en un piano con siete octavas, la nota más aguda realiza 128 vibraciones en el tiempo en que la nota más baja vibra una vez.

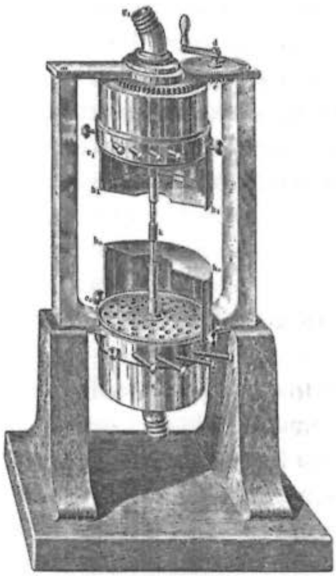
La nota *c*' es el *do* central del piano y realiza 264 vibraciones en un segundo. La nota *C* realiza 66 vibraciones. La nota más baja del piano es *C*' con 33 vibraciones y está próxima al límite inferior de nuestra audición. La cualidad del sonido de los tonos muy graves es pobre e insulsa, sin el color musical que caracteriza, por ejemplo, al sonido más agudo de un violín, y es difícil determinar su frecuencia y su afinación correcta. Los grandes órganos de tubos tienen una octava adicional por debajo de *C*'. La nota más grave, *C*'', realiza 16 ½ vibraciones en un segundo. Pero el oído no puede diferenciar estos tonos de un oscuro zumbido y es incapaz de distinguir las notas individuales. Por tanto, los tonos más bajos solo se utilizan en conjunción con los sonidos más agudos, con el fin de fortalecerlos y dar la impresión de profundidad.

Notas del piano desde la nota *C* (do) de 66 vibraciones por segundo. El do central corresponde a *c*'.

FIG. 1



LA DOBLE SIRENA



La doble sirena de Helmholtz era un peculiar instrumento que producía tonos musicales de una frecuencia determinada. Mediante un fuelle se soplaba aire por unos tubos que se hallaban dentro de unos cilindros de latón; el aire salía por unas tapas perforadas con agujeros. Debajo de cada tapa había un disco, perforado con agujeros igual que la tapa, conectado a un eje que lo hacía girar a una velocidad constante. Si los agujeros del disco y de la tapa coincidían, el aire podía salir por los agujeros. Pero si el disco giraba y sus agujeros no coincidían con la parte perforada de la tapa, el aire no podía escapar del cilindro. Al girar el disco rápidamente, los agujeros se abrían y cerraban alternativamente. El flujo de aire se convertía en una serie de soplidos discontinuos que, cuando se sucedían con suficiente rapidez, producían un tono musical. Cada uno de los discos giratorios tenía cuatro círculos concéntricos de agujeros. El disco inferior tenía 8, 10, 12, y 18 agujeros, y el superior, 9, 12, 15 y 16. La serie de agujeros en las tapas de los cilindros era precisamente la misma que en los discos. Un complejo mecanismo permitía abrir o cerrar cualquier círculo concéntrico de agujeros. Esto consentía variar el número de agujeros totales abiertos y, con ello, el tono producido. Cada cilindro terminaba en una caja de resonancia que suavizaba el sonido chillón de la sirena. Los agujeros estaban cortados oblicuamente, de forma que, al pasar, el mismo aire empujaba los discos, incrementando gradualmente su velocidad de giro. Supongamos que los discos giran a una velocidad de 33 revoluciones por segundo y que se ha abierto la serie de 8 agujeros en el cilindro inferior. Al dar una vuelta, los 8 agujeros habrán pasado por delante de cada uno de los 8 agujeros de la tapa. Por tanto, en cada revolución se emiten 8 soplidos y en un segundo serán 264, que es la frecuencia de la nota *c'*. Si se abre la serie de 16 agujeros en el cilindro superior, la frecuencia será el doble y se escucha la nota *c''*. Si se abren simultáneamente las series de 8 y 16 agujeros se emiten dos notas a la vez y se escucha el sonido consonante de la octava. Si se abren las series de 8 y 12 agujeros la relación entre el número de soplidos será de 2:3 y se obtiene el sonido consonante de la quinta. Del mismo modo, las series 12 y 15 dan una tercera mayor.

La nota más aguda del piano es c'''''', y realiza 4 224 vibraciones por segundo, mientras que la más alta del violín es e'''', con 2 640 vibraciones. El límite superior para la sensación de tono en los humanos se alcanza en la octava de la nota *c* con ocho comillas, con 32 770 vibraciones, que resulta dolorosa para el oído.

La sensación de altura de un tono musical es independiente de la forma en que se produce la vibración o del instrumento musical que lo produzca. Lo que distingue la nota *A* del piano de la misma nota *A* del violín, se denomina *cualidad* o *timbre* del tono.

ONDAS DE SONIDO

El sonido se propaga por el aire mediante un movimiento ondulatorio, similar al de las ondas producidas en la superficie del agua al arrojar una piedra. El movimiento consiste en subidas y bajadas de la superficie del agua, apreciables como crestas y depresiones, que se propagan en forma de anillos concéntricos. Una cresta y una depresión forman una onda. La longitud de la onda es la distancia entre dos crestas consecutivas. Aunque la onda se desplaza a lo largo de la superficie del agua, las partículas del agua solo suben y bajan. Esto se puede comprobar colocando un trozo de madera flotando en la trayectoria de la onda; lo que avanza es la onda, es decir, la forma de la superficie, y no el agua.

Pasemos ahora a las ondas de sonido. Supongamos que sustituimos el agua por aire y que comprimimos las ondas mediante una plancha rígida colocada sobre la superficie. Donde antes había una cresta porque la superficie de agua subía, ahora el aire se comprime (hay más presión), mientras que en las depresiones el aire se rarifica (hay menos presión). La onda de sonido consiste en un estrato de aire condensado seguido de otro estrato rarificado. Las ondas sonoras están producidas por oscilaciones de las moléculas del aire adelante y atrás, y se propagan en todas las direcciones en forma de ondas esféricas.

La longitud de una onda de agua de cresta a cresta puede ser variada: la caída de una gota o un soplo de aire rizan suavemente

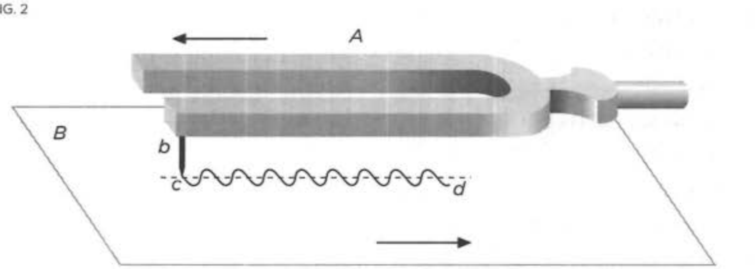
la superficie del agua en pequeñas ondas; las ondas que produce un barco pueden sacudir a un bañista, y las ondas de una tormenta en el océano pueden engullir a un barco. Las ondas de sonido presentan diferencias similares: los pequeños rizos del agua con longitudes de onda cortas corresponden a los tonos agudos; las olas gigantes del océano, a los tonos graves. La nota *C* tiene una longitud de onda de unos 5 m, mientras que el *do* central *c*' tiene 1,25 m. La longitud de onda de un tono se puede obtener dividiendo la velocidad del sonido entre la frecuencia, siendo la velocidad del sonido 332 m/s (a 0°, pero téngase en cuenta que la velocidad del sonido aumenta con la temperatura). Al doblar la frecuencia, la longitud de onda se reduce a la mitad. La nota *c*'' tiene 75 cm de longitud de onda; *c*''' tiene aproximadamente 38 cm, *c*'''' tiene 19 cm y la nota más aguda del piano, *c*''''', tiene unos 10 cm.

La longitud de onda se corresponde con el tono de una nota musical. La altura de las crestas o, en el caso del sonido, la variación de presión del aire en la onda, se corresponde con la *intensidad* del sonido (o su volumen). Pero las ondas con la misma altura y longitud pueden tener distintas formas. La cresta de una ola puede ser redondeada o puntiaguda. El *timbre* o *calidad* del tono es lo que en el sonido se corresponde con la *forma* de las ondas en el agua.

Antes de Helmholtz, solo se conocía la forma de las ondas de sonido en unos pocos casos. La forma de onda más simple posible correspondía a la onda elemental que se produce cuando el movimiento de cualquier punto de la superficie del agua es una

Fundamento del fonoautógrafo para dibujar el perfil de oscilación *cd* de un diapasón *A*, mediante la aguja *b* en contacto con una superficie en movimiento *B*.

FIG. 2

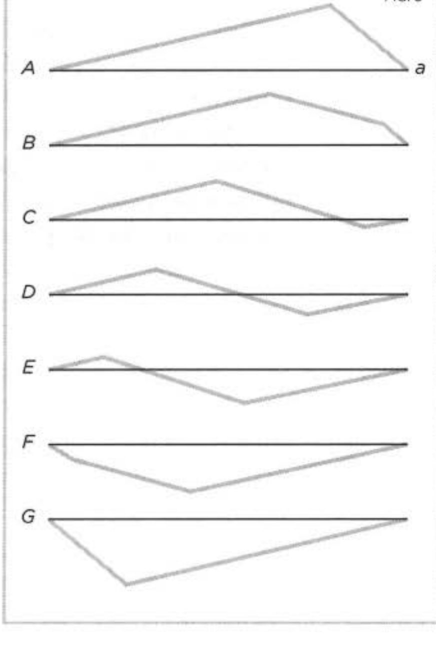


oscilación simple, similar a la de un péndulo. En el caso del sonido, los *tonos u ondas simples* corresponden a un movimiento exactamente pendular del aire. Las formas de onda elementales podían determinarse usando un diapasón en cuyo extremo se fijaba una aguja que permitía dibujar un trazo en un papel en movimiento, generalmente enrollado en un cilindro en rotación uniforme (figura 2), como en el instrumento llamado *fonoautógrafo*, desarrollado por Édouard-Léon Scott de Martinville (1817-1879) y Rudolph Koenig (1832-1901).

Esta forma de onda correspondiente al movimiento pendular se denomina *onda simple senoide* y matemáticamente se corresponde con la forma de la función seno $f(x) = \text{sen}\, x$. El físico alemán Georg Simon Ohm (1789-1854) caracterizó los tonos simples como las únicas formas de vibración que no contienen tonos parciales superiores armónicos. Los tonos simples tenían un timbre peculiar y podían producirse golpeando un diapasón frente a un tubo de resonancia convenientemente afinado. Helmholtz encontró que también el tono de la voz humana, cantando afinadamente la vocal *u* en las posiciones medias del registro sonoro, se aproximaba al tono simple.

Movimiento de una cuerda pulsada en la guitarra según Helmholtz.

FIG. 3



LAS ONDAS DE SONIDO EN LA GUITARRA Y EL VIOLÍN

Helmholtz estudió en detalle las características del timbre de los distintos instrumentos musicales y determinó matemáticamente el movimiento de la cuerda de un instrumento pulsado como la guitarra. Cuando la cuerda es pulsada asume la forma *A* de la figura 3. Al soltar la cuerda, esta pasa por la serie de formas *B*, *C*, *D*, *E*, *F*, hasta que alcanza *G*, que es la inversión de *A*, y luego vuelve a través de la misma serie,

hasta alcanzar *A* de nuevo. Por tanto, la cuerda oscila entre las posiciones *A* y *G*, que son como «latigazos» que se propagan hacia delante y hacia atrás.

La cuerda por sí misma no imparte ningún movimiento perceptible al aire. Si sus extremos se fijan en soportes rígidos no se escuchará ningún sonido. En la guitarra, el sonido de la cuerda alcanza el aire a través de una de sus extremidades «a», apoyada sobre un puente fijo en un tablero de madera, que puede vibrar elásticamente. El sonido depende del movimiento de esta extremidad, a través de la presión que ejerce sobre el tablero sonoro. La magnitud de esta presión, que se altera periódicamente con el tiempo, se muestra en la figura 4.

A lo largo de la línea *hh* se han marcado los tiempos *a*,... *g*, en que la cuerda pasa por las posiciones *A*,... *G* de la figura 3. Los pulsos representan la presión ejercida por el extremo de la cuerda en *a*. El primer pulso se produce al ejercer una presión inicial pulsando la cuerda en *A*, que disminuye rápidamente después de *B*, ya que la presión se propaga hasta el otro extremo de la cuerda. Cuando la presión vuelve de nuevo a *B* (se recibe el «latigazo» reflejado), el pulso se repite.

Las ondas de presión producidas por el tono de un violín se representan, siguiendo el mismo principio, en la figura 5. Durante cada período de vibración la presión se incrementa de modo uniforme y al final cae bruscamente. Durante la mayor parte de cada vibración la cuerda se pega al arco que la arrastra; de pronto se suelta y rebota, después de lo cual es agarrada por otros puntos del arco, que la vuelven a arrastrar.

Forma de la onda de sonido producida por la guitarra (fig. 4) y por el violín (fig. 5), según Helmholtz.

FIG. 4

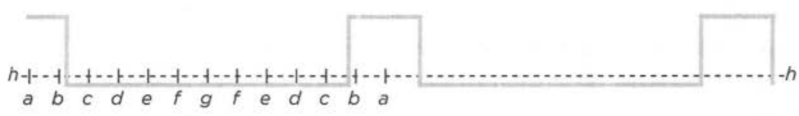


FIG. 5



La diferencia de timbre entre la guitarra y el violín se debe a la distinta forma de las ondas sonoras que producen. Cuanto más redondeado es el perfil de la onda, más suave, apacible y dulce es el sonido. Los diapasones, con su forma de onda sinuosa, tienen un sonido extraordinariamente suave, mientras el sonido áspero de la guitarra y el violín se debe a la forma angulada de sus ondas.

COMPOSICIÓN DE TONOS

Cuando una masa de aire es atravesada en todas direcciones por ondas sonoras se produce una combinación de muchos tipos distintos de ondas, que pasan la una sobre la otra, cada una siguiendo su camino sin disturbarse. Helmholtz consideraba muy instructiva a este respecto la visión del mar desde un acantilado. Podían observarse innumerables ondas, de distintas longitudes, propagándose en todas direcciones. De la misma manera, el aire en una sala de conciertos era atravesado por multitud de ondas sonoras de distintas longitudes producidas por cada instrumento, propagándose en todas direcciones y reflejándose en las paredes hasta disiparse, siendo sustituidas por nuevos tonos.

El oído está especialmente adaptado para revelarnos este espectáculo, que no puede verse como las olas del mar. Este órgano analiza las ondas sonoras, separa los distintos tonos que las componen y distingue las voces de hombres y mujeres, incluso de los individuos, las cualidades peculiares del tono de cada instrumento, los roces de los vestidos, las pisadas, etc.

Cuando arrojamos una piedra en un mar con oleaje se produce la misma onda de anillos concéntricos, que se mueve del mismo modo que en la superficie inmóvil de un lago. Lo que ocurre en este caso es que la nueva onda se *superpone* con la superficie del agua, que ya no es plana. La nueva forma de la superficie del agua se determina considerando que la altura de un punto es la suma de las alturas de todas las crestas de las ondas que coinciden en dicho punto, después de restar la suma de todas las depresiones similarmente coincidentes. Tal suma de magnitudes positivas

(las crestas) y negativas (las depresiones) se denomina *suma algebraica*. Por tanto, la altura de un punto en la superficie del agua es igual a la suma algebraica de todas las ondas que concurren en ese punto. Esto se denomina *principio de superposición*.

Lo mismo ocurre con las ondas de sonido. Las ondas se suman algebraicamente en cada punto del aire, así como en el interior del oído. Este complejo movimiento del aire producido por la suma de todas las ondas que se superponen en un punto es analizado por el oído en sus partes separadas con gran exactitud y precisión. Este poder del oído es de suprema importancia para escuchar. Sin esta propiedad sería imposible distinguir entre los distintos tonos.

RESONANCIA

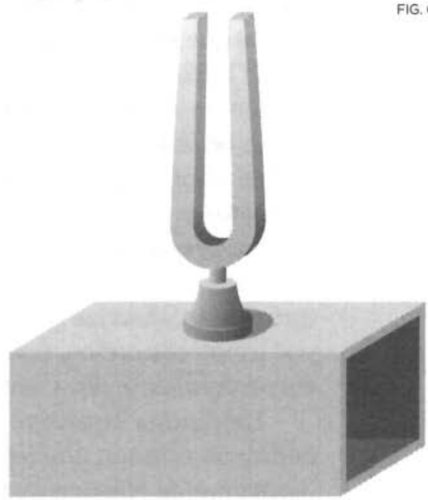
El fenómeno de la resonancia se puede observar en la producción de tonos simpáticos en un piano. La cuerda de un piano comienza a vibrar por sí sola cuando, por otros medios, se hace sonar su propio tono con suficiente fuerza. Esta *acción* o *resonancia simpática* de la cuerda se produce por la acción de las partículas vibrantes del aire contra la cuerda y contra el tablero resonante. Por supuesto, cada cresta de la onda de sonido que pasa por la cuerda es demasiado débil para producir un movimiento apreciable en ella. Pero cuando una larga serie de ondas golpean la cuerda, cada onda sucesiva incrementa ligeramente el débil tremor resultante de la acción de sus predecesores, hasta que el efecto finalmente resulta apreciable.

El proceso de la resonancia simpática puede observarse en el balanceo de una pesada campana. Un hombre fuerte apenas puede moverla apreciablemente con un único impulso. Pero un niño, tirando de la cuerda a intervalos regulares, coincidiendo con el tiempo de su oscilación, puede gradualmente llevarla a un movimiento violento. El reforzamiento de la vibración depende exclusivamente de la aplicación rítmica del impulso; al tirar de la campana cuando está cayendo, se incrementa ligeramente su ve-

locidad, que llegará gradualmente a ser considerable. Sin embargo, si el impulso se aplica en intervalos *irregulares*, unas veces cuando la campana está cayendo y otras cuando está subiendo, no se producirá ningún efecto apreciable.

De la misma forma que un niño puede balancear una campana, las vibraciones del aire pueden poner en movimiento un pesado diapasón de acero, siempre que el tono del sonido sea exactamente unísono con el del diapasón, porque en este caso también cada impacto de la onda sonora contra el diapasón incrementa infinitesimalmente su movimiento excitado por los pulsos anteriores.

FIG. 6



Recreación del diapasón fijado en una caja resonante usado por Helmholtz en los experimentos de resonancia simpática.

Debido a su peso, los diapasones eran uno de los cuerpos más difíciles de poner en vibración simpática. Era necesario fijarlos en una caja de resonancia (figura 6). Las cuerdas de un piano entraban mucho más fácilmente en vibración simpática. Ello podía comprobarse visualmente pegando pequeñas tiras de papel en todas las cuerdas. Los tonos emitidos por voces o instrumentos solo ponían en movimiento las tiras de papel de las cuerdas con el tono correspondiente.

LA TEORÍA DE HELMHOLTZ DE LA AUDICIÓN

Helmholtz argumentó que, puesto que el oído interno poseía una estructura similar a la serie de cuerdas del piano, su función debía de ser la de un sistema resonador similar al que hemos descrito. En lo más profundo del oído interno, existía un órgano óseo denominado *cóclea* o *caracol*, una cavidad llena de líquido linfático. Se trata de un pasaje en espiral dividido longitudinalmente en tres

secciones (superior, media e inferior), separadas por dos membranas que se ensanchan a mitad de su altura. El marqués Alfonso Corti (1822-1876) había descubierto en 1851 una compleja formación en un ensanchamiento de la membrana basilar, en la sección media de la cóclea. Era el órgano de Corti, que está enrollado en espiral dentro del caracol y contiene una serie de innumerables estructuras laminares de tamaño microscópico, alineadas una junto a la otra como las teclas de un piano y conectadas con las fibras del nervio auditivo y con la membrana basilar. Tales estructuras están afinadas para vibrar al ser excitadas simpáticamente por tonos concretos, como las teclas de un piano, con lo que la correspondiente fibra nerviosa experimenta una sensación.

Helmholtz concluyó que las terminaciones de los nervios auditivos estaban conectadas con un peculiar aparato auxiliar, parcialmente elástico, parcialmente fijo, que podía ser puesto en vibración simpática, gracias al cual el oído era capaz de analizar las ondas sonoras descomponiéndolas en sus frecuencias elementales. Muchos años después, el húngaro Georg von Békésy (1899-1972) confirmó la teoría de Helmholtz, observando las vibraciones de la membrana basilar en las cócleas de animales muertos y cadáveres humanos, por lo que recibió el premio Nobel de Fisiología en 1961.

Por otra parte, el matemático francés Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) había establecido un importante teorema que puede trasladarse al lenguaje ordinario de la siguiente forma: cualquier forma de onda arbitraria puede ser descompuesta como suma de ondas simples de diferente longitud. La más larga de estas ondas simples tiene la misma longitud que la onda original. Las otras ondas componentes tienen sucesivamente longitudes más cortas, obtenidas dividiendo la longitud original por 2, 3, 4, 5, etcétera.

El teorema de Fourier establecía que, combinando estas ondas simples (senoides), podía obtenerse una ilimitada multiplicidad de formas de onda. Podemos ver un ejemplo en la figura 7. Las curvas *A* y *B* representan dos tonos simples, que se diferencian en que la longitud de onda de *B* es el doble que la de *A* y, por tanto, su tono es una octava más alto. *C* y *D* representan las ondas

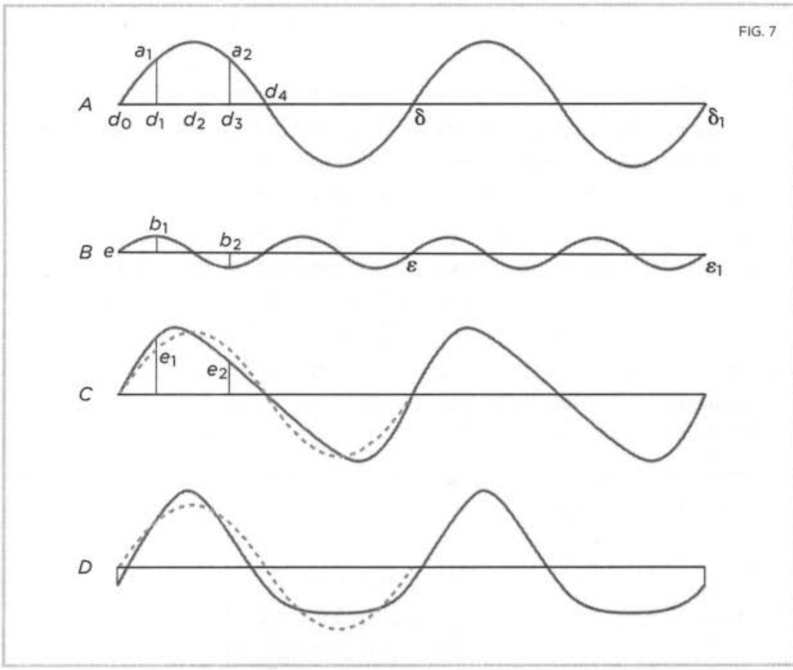


FIG. 7

Ilustración del teorema de Fourier en la superposición de ondas.

que resultan de superponer *A* y *B*. En *C* los dos puntos iniciales de las ondas *A* y B coinciden en el mismo punto. En *D* la onda *B* se ha desplazado de manera que la depresión de *B* coincide con el punto inicial de *A*. El resultado son dos formas de onda distintas. *C* tiene subidas más acusadas y bajadas más suaves. *D* tiene crestas más afiladas y depresiones planas.

Cuando componemos dos ondas de sonido producidas por distintos instrumentos, las dos ondas se propagan juntas a la misma velocidad del sonido y nunca se separan. Cuando esta onda compuesta excita el oído no hay nada que indique si la forma de la onda ha sido producida por uno o varios instrumentos. Cuando el oído analiza esta onda, debemos distinguir entre la *sensación* audible, que se produce sin ninguna intervención intelectual, y la *concepción* mental que se forma como consecuencia de la sensación. La sensación consiste precisamente en lo que matemáticamente expresamos mediante el teorema de Fourier. El oído separa la onda en una suma de tonos simples y siente separada-

EL ÓRGANO DE CORTI

La figura 1 muestra el aspecto de un fragmento de esta extraordinariamente complicada formación visto desde el interior de la sección media de la cóclea (el grabado pertenece a la edición de 1885 de *Sobre las sensaciones del tono*). Había más de 4000 estructuras laminares alineadas formando una bóveda. Estas estaban formadas por unas células alargadas que poseían en un extremo pequeños filamentos o cilios (modernamente denominadas células ciliadas). En la figura 2A (extraída de la misma edición) se muestra un arco de Corti individual formado por una pareja de células ciliadas, la exterior, *i*, y la interior, *e* (en realidad, hay tres filas de células ciliadas exteriores en cada arco de Corti). En la figura 2B se muestra una serie de cinco arcos de Corti alineados y sus salidas y entradas en 1 y 2 de la membrana basilar. Los arcos de Corti pueden vibrar arriba y abajo cuando entran en resonancia con la onda sonora, cada uno afinado a una frecuencia distinta. En la primera edición de *Sobre las sensaciones del tono* (1863) Helmholtz pensaba que la afinación estaba asociada a la distinta rigidez y tensión de los arcos de Corti. Pero las medidas de la anchura de la membrana basilar realizadas por Victor Hensen (1835-1924) y la demostración de Carl Hasse (1841-1922) de que los arcos de Corti están ausentes en las aves y los anfibios, le permitieron afirmar con certeza que la anchura modificaba la afinación. La anchura de dicha membrana era doce veces mayor en el extremo final de la cóclea que en su inicio. Por tanto, las frecuencias agudas excitaban la zona anterior del órgano de Corti, y las graves, la zona posterior.

FIG. 1

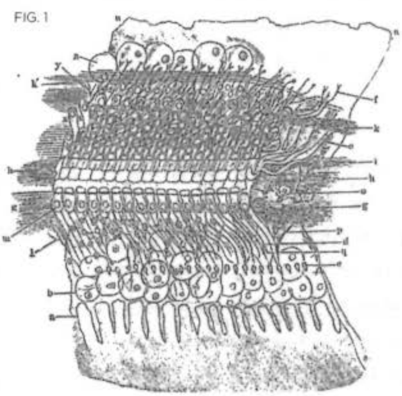


FIG. 2A

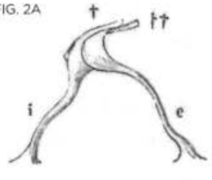
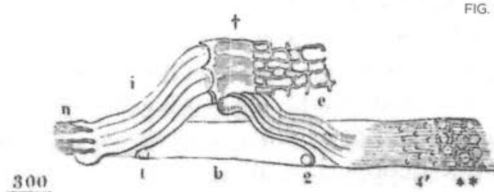


FIG. 2B



mente la frecuencia de cada uno de ellos, tanto si la onda proviene de un único instrumento como si proviene de varios.

Por ejemplo, al pulsar una cuerda en la guitarra, se produce una onda en forma de pulsos, que no corresponde a un tono simple. Cuando el oído analiza esta forma de onda, escucha una serie de tonos simples. Como la frecuencia de una onda es inversamente proporcional a la longitud de onda, el teorema de Fourier se puede formular diciendo que cualquier onda se descompone como suma de ondas simples con frecuencias f, $2f$, $3f$, $4f$, etc., siendo f la *frecuencia fundamental*, y el resto, las *frecuencias parciales superiores* o *tonos armónicos*. La serie de tonos que se escucharán está así perfectamente determinada por el teorema de Fourier. En primer lugar, el tono fundamental es el más audible y, por tanto, el que define la nota musical correspondiente. Simultáneamente se escucharán los tonos armónicos, cuya intensidad irá disminuyendo a medida que aumenta su frecuencia.

Así, si la nota fundamental es la nota *C*, la serie de los nueve primeros armónicos superiores corresponde a las siguientes notas:

$$c, g, c', e', g', b'\flat, c'', d'', e''.$$

El primer armónico tiene frecuencia $2f$, el doble que la fundamental, que corresponde a la octava musical *c*. El segundo armónico tiene una frecuencia $3f$, que está en relación 3/2 con el primero y, por tanto, forma con este un intervalo de quinta, es decir, la nota *g*. El tercer armónico tiene frecuencia $4f$ y corresponde a la octava del primer armónico, o sea, la nota c'. El cuarto armónico tiene frecuencia $5f$, y su relación con el tercero es 5/4; por tanto, forma con este un intervalo de tercera mayor, es decir, es la nota e'. El quinto tiene frecuencia 6f, que es la octava de $3f$, o la nota g'. El sexto tiene frecuencia $7f$, en relación 7/4 con c' y forma con este un intervalo de *séptima natural*, que corresponde aproximadamente a la nota b' *bemol*. Esta serie continúa indefinidamente, aunque los armónicos más altos son cada vez más débiles y llega un momento en que son prácticamente inaudibles.

LA TEORÍA DE LA PERCEPCIÓN

Los tonos producidos por instrumentos musicales excitan en el oído la sensación del tono fundamental y de los primeros armónicos. Pero, aunque están siempre presentes, no solemos percibir la existencia de tales tonos parciales. En efecto, se necesita un peculiar acto de atención para escucharlos y, a no ser que sepamos cómo hacerlo, los armónicos quedan ocultos. Esto se debe a que las percepciones obtenidas por los sentidos son solo sensaciones aplicadas a nuestro sistema nervioso. Se requiere una actividad intelectual para pasar de una sensación nerviosa a la concepción de un objeto externo.

«Solo después de una práctica considerable adquirimos el poder de extraer conclusiones correctas de nuestras sensaciones.»

— Hermann von Helmholtz, «Las causas fisiológicas de la armonía en música».

Según la teoría de la percepción de Helmholtz, las sensaciones son meros símbolos que indican cierto objeto externo y, solo después de considerable práctica, podemos emitir conclusiones correctas acerca de dichos objetos a partir de nuestras sensaciones. La percepción es un acto inconsciente extraordinariamente eficiente, orientado a la pura utilidad práctica, en el que solo prestamos la atención suficiente para reconocer el objeto externo. Todas las sensaciones que no tienen referencia directa a objetos externos son ignoradas completamente y no somos conscientes de ellas a no ser que realicemos una investigación científica de las acciones de los sentidos o, por alguna enfermedad, dirijamos nuestra atención a nuestros propios cuerpos. Por ejemplo, a veces los enfermos que sufren algún tipo de inflamación ocular se dan cuenta de que ven pequeños puntos de luz y estructuras fibrosas flotando caprichosamente dentro del humor vítreo del ojo y lo achacan a la enfermedad, cuando en realidad han estado allí presentes toda su vida.

Los tonos parciales pertenecen a esta clase de fenómenos. No es suficiente que el nervio auditivo reciba una sensación. Es

necesario que el intelecto actúe sobre ella. Siempre escuchamos el tono de una guitarra como cierta combinación de ondas parciales. Una diferente combinación de tonos corresponde a una flauta, a la voz humana o al ladrido de un perro. Cuando escuchamos un sonido que nos interesa, nuestro oído se ocupa de distinguir con precisión las peculiaridades de su tono, pero somos completamente indiferentes a los *medios* utilizados para este fin. No tiene interés práctico para nuestra percepción si el tono de una guitarra contiene la octava o la doceava nota. Por tanto las parciales superiores son arrojadas al montón de peculiaridades no analizadas de un tono que llamamos su *timbre*.

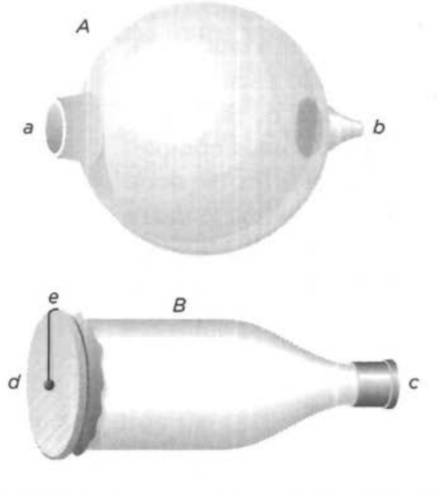
LAS VOCALES

Cuanto más habituados estamos a un timbre, más difíciles de apreciar son sus tonos parciales. Este es el caso de la voz humana. En noviembre de 1856 Helmholtz había avanzado en una nueva teoría sobre los tonos de las vocales. Descubrió que las vocales se diferencian unas de otras por sus armónicos. Para poner de manifiesto los armónicos, describió un experimento que podía realizarse con el piano.

Una voz cantaba la vocal *o* con la nota *e bemol* cerca de un piano. Entonces se tocaba ligeramente la nota *b' bemol* (el tercer armónico), escuchando atentamente el sonido del piano mientras se atenuaba. Si *b' bemol* era un auténtico tono parcial emitido por el cantante, daría la impresión de que el sonido del piano no se había extinguido, ya que la nota parcial correspondiente a la voz seguiría escuchándose como si la nota del piano continuara. Modificando el experimento era posible distinguir entre las distintas vocales por sus tonos parciales. Lógicamente, el experimento funcionaba mejor con cantantes experimentados.

La investigación era más fácil con la ayuda de pequeños tubos resonadores de vidrio o metal como los mostrados en la figura 8 (pág. siguiente). Algunos de los resonadores de Helmholtz eran esféricos (*A*) y tenían una gran abertura que se orientaba

FIG. 8



Recreación de dos resonadores de Helmholtz: uno esférico; el otro, creado a partir de una botella.

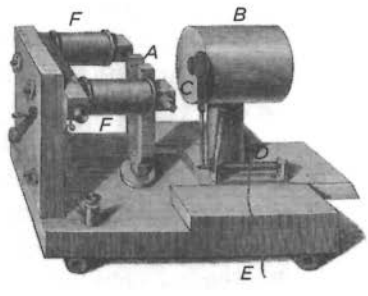
hacia la fuente del sonido (*a*), y un pequeño orificio en forma de embudo en el otro extremo (*b*), que se introducía en la oreja. Otros resonadores consistían en botellas con una membrana en su base (*B*). El sonido se propagaba desde el orificio de la boca abierta (*c*) a través del aire de la botella hasta la membrana. De una fibra de hilo de seda atada en (*e*) colgaba una pequeña gota de cera (*d*) como un péndulo en contacto con la membrana. El pequeño péndulo se agitaba violentamente cuando la membrana vibraba.

Cada resonador tenía su propio tono característico, que podía escucharse soplando por el orificio. Si este tono era excitado por un sonido, bien por su tono fundamental o por alguno de sus tonos parciales, la masa de aire del resonador entraba en vibración por resonancia y el oído conectado con él podía escucharlo con intensidad amplificada. Usando un resonador era posible determinar si su tono formaba parte de un tono compuesto.

Mediante estos experimentos, Helmholtz generó la siguiente lista de vocales, donde 1 representa el tono fundamental y 2, 3, 4, 5, 6 y 7 los sucesivos armónicos:

A: además de 1, se distinguen los armónicos 3 y 5, mientras que 2, 4 y 7 son más débiles.
O: 3 es algo más débil que en A, mientras que 2 y 5 son muy débiles.
U: principalmente la fundamental, con un armónico 3 débil.
E: 2 es muy fuerte, mientras que los armónicos superiores no son audibles.
I: 2 y 3 son característicos de esta vocal, mientras que 5 es muy débil.

EL SINTETIZADOR DE SONIDO DE HELMHOLTZ



Para su primer sintetizador de sonidos Helmholtz utilizó una serie de ocho diapasones como el de la figura, afinados a los tonos *B bemol* y a sus primeros siete armónicos. Cada diapasón (*A*) estaba colocado frente a un tubo resonador (*B*), afinado a la frecuencia del diapasón. El resonador tenía una tapadera (*C*) que se abría accionando la palanca (*D*) cuando se tiraba de la cuerda (*E*). Las cuerdas de los ocho resonadores iban a parar a un teclado, que permitía accionar manualmente cualquier combinación de notas. La intensidad de cada nota se podía controlar abriendo parcialmente la abertura. Cada diapasón se hacía vibrar con un electroimán (*F*) por el que pasaba una corriente eléctrica intermitente 120 veces por segundo. En cada pulso eléctrico el hierro del electroimán se volvía momentáneamente magnético y atraía al correspondiente brazo del diapasón, impulsándolo en su movimiento vibratorio. Este aparato permitió a Helmholtz sintetizar sonidos complejos a voluntad y le permitía controlar las distintas componentes. Los sonidos producidos eran estacionarios, tanto en frecuencia como en intensidad, y podían mantenerse ininterrumpidamente.

Para sustentar su idea, en 1859 Helmholtz construyó un nuevo aparato sintetizador de sonido con una serie de diapasones impulsados electro-magnéticamente. Este ingenioso aparato era una auténtica máquina que *hablaba*, y el investigador lo utilizó para reconstruir e imitar las vocales. Los sonidos producidos resultaban más *cantados* que *hablados*, debido a la constancia del sonido.

LA FÍSICA DE LA ARMONÍA Y DE LA DISONANCIA

Resulta una notable coincidencia que fuera en Bonn, la ciudad que vio nacer a Beethoven en 1770, donde Helmholtz leyó su en-

sayo «Las causas fisiológicas de la armonía en la música» ante una entusiasta audiencia en el invierno de 1857. Helmholtz siempre fue un amante de la música. Para él existían profundas relaciones internas entre el arte y la ciencia. El arte también perseguía conectarnos con la realidad, expresando concepciones psicológicas verdaderas, aunque lo hacía a través de los sentidos y no a través de los conceptos. Pero, en última instancia, una obra de arte representaba también una idea conceptual. La física y las matemáticas eran actividades mentales opuestas a la música y, sin embargo, en ellas estribaba la solución al problema de la armonía musical que tanto interesaba a Helmholtz. Con su teoría de la consonancia y disonancia, culminó su reforma de la acústica fisiológica unificándola con la teoría de la armonía musical.

Helmholtz asociaba la consonancia y la disonancia con el conocido fenómeno de los *batidos* o *batimentos*. Cuando dos tonos musicales tienen frecuencias cercanas pero no coincidentes, se escuchan *pulsaciones* en un número igual a la diferencia entre las dos frecuencias. Este fenómeno era utilizado en la afinación de los instrumentos. Los batimentos surgen como consecuencia de la *interferencia* que se produce entre las dos ondas.

Consideremos la composición de dos ondas de la misma longitud moviéndose en la misma dirección. Si las crestas de una coinciden con las crestas de la otra, y ambas son de la misma altura, las crestas de la onda resultante serán el doble de altas, y las depresiones, el doble de profundas. Por el contrario, si las crestas de una coinciden con las depresiones de la otra, ambas crestas y depresiones se anularán en la onda resultante, es decir, las dos ondas se destruyen entre sí por interferencia. En el caso del sonido, la interferencia hace posible que un sonido sea silenciado por otro sonido similar. La sirena polifónica permitía generar interferencias fácilmente. Bastaba con abrir la misma serie de agujeros en los cilindros superior e inferior, de manera que ambos emitieran el aire simultáneamente. Entonces se escuchaba un sonido reforzado. Si se disponían los agujeros de manera que el aire saliera de un cilindro en el momento en que el otro tenía los agujeros tapados, el tono fundamental se anulaba por interferencia y solo se escuchaba un débil sonido de los tonos parciales.

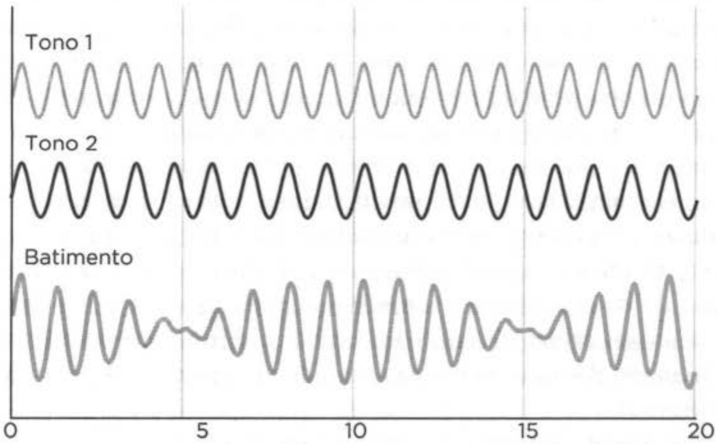


FIG. 9

Representación gráfica de dos ondas y de su suma, observándose los batimentos.

Si dos tonos son exactamente de la misma frecuencia y se producen simultáneamente y sus crestas coinciden al principio, entonces sus crestas coincidirán siempre. Si las crestas no coinciden al principio, entonces no coincidirán nunca. Por tanto, ambos tonos se reforzarán o se destruirán perpetuamente. Sin embargo, si los dos tonos son solo *aproximadamente* de la misma frecuencia, y su elevación coincide al principio, ambos se reforzarán inicialmente, pero las crestas de uno dejarán paulatinamente atrás a las del otro y llegará un momento en que coincidirán con las depresiones del otro. Más adelante las crestas de ambos sonidos se volverán a encontrar y se repetirá el proceso sucesivamente. El resultado se escuchará como una alternancia entre incremento y disminución del sonido, que llamamos *batimento*.

Es fácil comprobar que el número de batimentos en un segundo es igual a la diferencia entre el número de oscilaciones de los dos tonos. La figura 9 muestra los gráficos de dos ondas de la misma intensidad (tono 1 y tono 2), que realizan 20 y 18 oscilaciones en un segundo. Sus crestas coinciden en los puntos 1, 10 y 20. Sus valles coinciden en los puntos 5 y 15. En la parte inferior se presenta la gráfica de la onda compuesta obtenida sumando las

dos ondas anteriores. Se observan dos batimentos, es decir, dos bajadas y subidas de intensidad; el número de batimentos es precisamente la diferencia entre el número de oscilaciones: $20-18=2$.

Al aumentar la diferencia entre los tonos, los batimentos se suceden más rápidamente. El oído puede distinguirlos siempre que no haya más de cuatro a seis batimentos en un segundo. Si son más frecuentes, ya no se distinguen como batimentos individuales, sino que se aprecian globalmente como cualquier otro tono. Cuando son distinguibles, los batimentos excitan una sensación de discontinuidad (subida y bajada de volumen), que resulta desagradable para el oído, similar a la molestia de escuchar martillazos. Esta aspereza del tono es el carácter esencial de la *disonancia.*

En el lenguaje moderno de la física ondulatoria, los batimentos son pulsos o señales intermitentes que se transmiten en un *tren* o *grupo de ondas*. Cada pulso «transporta» un tono (la señal) que empieza en un cierto instante y termina cierto tiempo más tarde. El tono transportado tiene una frecuencia intermedia entre los dos tonos simples que componen el grupo de ondas. El oído escucha estos pulsos como «notas» separadas que empiezan y terminan, de la misma forma que escuchamos las sílabas de una palabra, puesto que al hablar también emitimos pulsos.

En nuestro sistema musical cada octava se divide en doce notas musicales: *c, c#, d, d#, e, f, f#, g, g#, a, a#, b.* El intervalo entre dos de estas notas musicales consecutivas se llama *semitono.* La disonancia más desagradable para el oído se produce, por tanto, cuando escuchamos simultáneamente dos notas que difieren en un semitono, ya que los batimentos son más lentos. Cuando la diferencia es un tono completo (dos semitonos) la molestia es menor. Cuando la diferencia es una tercera (un tono y medio o dos tonos) la disonancia desaparece, al menos en las partes altas de la escala. El intervalo de tercera pasa a ser una *consonancia.*

Aunque dos tonos fundamentales difieran en frecuencia lo suficiente para ser consonantes, es posible que sus tonos parciales produzcan batidos audibles que hagan el tono molesto. Si dos tonos forman un intervalo de *quinta (do-sol)*, esto significa que

la relación entre sus frecuencias es exactamente 2 a 3. Entonces ambos tonos comparten un armónico superior, el tercero y el segundo, respectivamente, ya que $2 \cdot 3 = 3 \cdot 2 = 6$. Si la relación entre ambos tonos no es exactamente 2/3, dichos armónicos superiores ya no serán iguales y producirán batimentos, generando un timbre «desafinado» áspero para el oído. Con nuestro sistema musical estos batimentos realmente existen, ya que todas las quintas son imperfectas, aunque la diferencia es tan pequeña que los batimentos son muy lentos y, además, son más débiles que los tonos fundamentales, por lo que no somos conscientes de ellos.

De la misma manera, dos tonos cuyas frecuencias estén precisamente en la relación 3 a 4 (un intervalo de cuarta) suenan mucho mejor que otros dos tonos cuya relación difiera ligeramente de esta relación, ya que tienen en común los armónicos cuarto y tercero, respectivamente ($3 \cdot 4 = 4 \cdot 3 = 12$). Si la relación fuera ligeramente distinta de 3/4, dichos armónicos producirían disonancia. El mismo principio se aplica cuando la relación entre los tonos es 4/5 (una tercera mayor), etc. De esta manera, si se ha elegido un cierto tono como fundamental, existe un preciso número de tonos que pueden sonar en consonancia con él.

Esta es la razón por la cual la música moderna, que se basa en la consonancia armónica de los tonos, ha limitado su escala a cierto número de notas. Cuando un armónico es común a dos notas sucesivas en una melodía, el oído reconoce cierta relación entre ellas, sirviendo como lazo artístico de unión. El enigma que Pitágoras propuso hacía más de 2 500 años y que el mismo Euler había sido incapaz de resolver, quedaba por fin explicado con una teoría coherente.

Los fenómenos descritos por Helmholtz eran solo el primer paso para entender la belleza de la música. La música no sería interesante para el intelecto si la escala únicamente incluyera intervalos de tercera, cuarta, quinta y octava (las notas más armoniosas). Por ello hay también notas intermedias que producen en la melodía una sensación transitoria de disonancia, durante la cual los nervios de quien escucha se ven afectados inconscientemente por los batimentos de tonos incompatibles y se siente el deseo de que los tonos fluyan hacia la armonía. La alternancia de

consonancia y disonancia es la base de la melodía. De la misma forma que el sonido del océano a veces se repite rítmicamente, hasta que, súbitamente, cambia, y llama nuestra atención, en una obra de arte musical, el movimiento de la melodía y la armonía comunica el flujo de las propias emociones del artista, que usa la sucesión de consonancias y disonancias para sorprender y despertar sentimientos.

CAPÍTULO 4

La formación de la física clásica

En 1871 Helmholtz fue nombrado profesor de Física en la Universidad de Berlín, lo que le permitió dedicar toda su atención a la física teórica. Durante dos décadas realizó investigaciones en electrodinámica, termodinámica y mecánica, con notables aportaciones en cada campo. Su reputación continuó creciendo y, al frente del Instituto Imperial de Física y Tecnología, contribuyó a hacer de Alemania una de las grandes potencias en el ámbito de esta ciencia.

El año 1860 fue un período triste y difícil para Helmholtz. A pesar de la devota dedicación de su suegra, que se había quedado al cuidado de sus dos hijos, su casa le parecía vacía y desolada. Debido a las noches en vela y a la agitación continua vivida durante la enfermedad de Olga, tras la muerte de esta Helmholtz enfermó, padeciendo fuertes y frecuentes dolores de cabeza y ataques de fiebre, que le imposibilitaron trabajar durante varios meses. A partir de marzo se vio algo recuperado y pudo finalizar su estudio sobre los fenómenos de contraste y las post-imágenes en la visión, que formaba parte del segundo volumen del *Tratado de óptica fisiológica*, que se publicó en el verano de 1860. Fue por entonces cuando, en base a los descubrimientos que estaba haciendo en acústica, Helmholtz decidió escribir su libro *Sobre las sensaciones del tono como una base fisiológica de la teoría de la música* con el fin de exponer, en un lenguaje comprensible, las bases psico-fisiológicas de la teoría de la armonía.

Su fama como fisiólogo y físico se había extendido por toda Europa y, en los últimos meses del año, recibió honores y premios de diversas sociedades científicas de Gotinga y Frankfurt. En el verano de 1860 pasó varias semanas en la isla de Arran, con su amigo William Thomson (lord Kelvin). Este viaje alivió algo su estado mental y físico. A su regreso, se dedicó exclusivamente a temas de acústica y, en diciembre, publicó su artículo «Sobre el movimiento

de las cuerdas del violín» en la revista *Proceedings of the Philosophical Society of Glasgow*. Sin embargo, en Navidad, en el primer aniversario de la muerte de Olga, el panorama de Helmholtz era desolador: viudo y con dos hijos pequeños, veía cómo su productividad científica estaba menguando y su carrera corría el peligro de atrofiarse. Fue entonces cuando decidió volver a casarse.

UNA NUEVA VIDA

Anna von Mohl era una joven de veintiséis años que lo tenía todo para agradar a Helmholtz y, especialmente, para entenderlo y ayudarlo en su carrera como investigador. Era mucho más joven que él y pertenecía a una familia cultivada de Heildelberg. Desde que la conoció, a su llegada a la ciudad, había llamado su atención por su inteligencia. Sin embargo, poco después de conocerse, Anna decidió trasladarse a París acompañada de su tío y luego a Inglaterra en compañía de su tía. En estas estancias Anna se impregnó de la cultura de ambas naciones; hablaba francés fluidamente y su inglés era bastante mejor que el de Helmholtz. A pesar de las reticencias iniciales del investigador, que consideraba que un viudo con dos hijos nunca sería aceptado por una joven como Anna, lo cierto es que ambos comenzaron a verse con frecuencia tras el regreso de ella a Alemania. A partir de ese momento los acontecimientos se sucedieron rápidamente y Helmholtz le propuso matrimonio en febrero de 1861; la boda se celebró el 16 de mayo de 1861.

Helmholtz eligió una esposa que respondía a todas sus necesidades. Anna era una persona de una gran fuerza de carácter, con talento, inteligente y grandes aspiraciones sociales; fue una compañera admirable durante el resto de su vida. Del segundo matrimonio de Helmholtz nacieron tres hijos: Robert (1862-1889), Ellen (1864-1941) y Fritz (1868-1901). En 1884 su hija Ellen se casó con el hijo de Werner von Siemens, fundador de la empresa Siemens. Anna murió en 1899.

Cuando volvió a Heidelberg en compañía de su joven esposa, Helmholtz había dejado atrás todo el desánimo y la pesadumbre

que habían acompañado su vida en los últimos años. En el verano de 1861, la pareja emprendió un largo viaje por Suiza e Italia. En septiembre recogió en Dahlem a sus dos hijos Katharina y Richard, que habían estado viviendo con su abuela desde su boda. Con renovadas energías, animado por la compañía y atenciones de Anna, durante los años siguientes Hermann continuó incansable su trabajo, viajando frecuentemente por Europa, sobre todo a Inglaterra, donde nunca dejaba de visitar a su gran amigo William Thompson. Anna lo acompañaba en sus viajes siempre que era posible.

El período de mayor actividad y el más productivo de Helmholtz tuvo lugar en Heidelberg a partir del año 1862. En estos *años heroicos* trabajó simultáneamente en *Las sensaciones del tono* (la primera edición se publicó en 1863 y la tercera en 1870) y en el tercer volumen del *Tratado de óptica fisiológica* (editado en 1867). Sus puntos de vista epistemológicos iban tomando forma en un sistema consistente de filosofía de la ciencia; estaba incesantemente ocupado con complejos problemas de teoría de fluidos y, al mismo tiempo, comenzaba a dirigir su atención a la investigación de los axiomas de la geometría. Durante los siguientes diez años, Helmholtz reveló una actitud resuelta y una gran iluminación en su visión de los problemas científicos, demostrando una comprensión de todas las fuentes de conocimiento disponibles para la investigación en prácticamente todas las áreas de ciencia que pocas veces se ha dado y que solo pudieron apreciar en toda su magnitud aquellos que tuvieron el privilegio de conocer personalmente su extraordinario genio.

PROFESOR DE FÍSICA EN BERLÍN

Durante esos años Helmholtz realizó un gran número de logros y descubrimientos científicos, algunos de los cuales ya han sido expuestos en los capítulos anteriores. De este modo, en 1870 ya era reconocido como el científico más importante de Europa. En abril de aquel año, Du Bois-Reymond, rector de la Universidad de Berlín, le informó de la muerte de Magnus, lo que dejaba vacante su

cátedra de Física. Unos años antes, Helmholtz había rechazado un puesto similar en la Universidad de Bonn, pero ahora contempló la situación con más calma. Desde 1867 había abandonado paulatinamente sus investigaciones en fisiología, y el nuevo puesto le daría la oportunidad de dedicarse por entero a la física en el centro neurálgico de la inminente Alemania unificada, donde el horizonte de oportunidades científicas sería más amplio.

Finalmente, la Universidad de Berlín propuso a dos candidatos: Helmholtz y Kirchhoff. Mientras que el primero era el más productivo y constantemente se ocupaba de nuevos problemas, el segundo era uno de los más renombrados físicos de Alemania y tenía una mayor inclinación por la docencia. Du Bois-Reymond viajó a Heidelberg para ocuparse personalmente de las negociaciones en representación del ministro prusiano. Finalmente, Kirchhoff prefirió permanecer en Heidelberg y Helmholtz hizo saber a Du Bois-Reymond sus condiciones para ocupar la cátedra de Física en Berlín:

1. Un salario de 4000 táleros.

2. La promesa de construir un Instituto de Física con todo el equipamiento necesario para enseñanza, para el trabajo privado del director y para los trabajos prácticos de los estudiantes.

3. La promesa de que él se haría cargo del Instituto y de todos los instrumentos, y que se dejaría a su juicio establecer las condiciones bajo la cuales se podía permitir su uso compartido con otros profesores.

4. Un alojamiento oficial para él en el Instituto y la concesión de una renta mientras este se construía.

5. Uso provisional de locales en las inmediaciones de la Universidad para su trabajo en física y para sus estudiantes, garantizando los servicios necesarios.

6. Una dotación apropiada para los gastos de viajes.







FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
Una fotografía de Helmholtz en 1894, tomada poco antes de su muerte.

FOTO SUPERIOR DERECHA:
Lienzo de Anton von Werner de 1878 en el que aparecen, entre otros, el príncipe heredero Federico III y, a su lado, Hermann von Helmholtz.

FOTO INFERIOR:
Una fotografía realizada en Washington en 1893. De izquierda a derecha, Hugo Kronecker (fisiólogo y hermano del matemático Leopold), Helmholtz, Henry Villard (periodista y presidente de la Northern Pacific Railway), Anna von Helmholtz y el físico Thomas Corwin Mendenhall.

El 28 de junio de 1870 Helmholtz recibió una carta del ministro de Educación aceptando sus condiciones. Pero en los días que siguieron el científico entró en un estado de gran agitación. El nerviosismo debido a los inminentes cambios se vio incrementado a causa de la inquietante noticia de que podía estallar una guerra entre Prusia y Francia. Después de ganar la guerra contra Austria en el tumultuoso verano de 1866, Prusia se había hecho con el control del nuevo Estado confederado de Alemania del Norte. Fueron unas semanas de gran excitación y entusiasmo para Helmholtz y Anna, que abrazaban la causa de Prusia, pero también de preocupación por la posición que Baden ocupaba como Estado independiente, ya que el canciller Bismarck pretendía anexionar los tres Estados del sur (Baviera, Wurtemberg y Baden), a lo que se oponía Francia, que temía el fortalecimiento de su eterno enemigo.

Tras los incidentes diplomáticos por la sucesión del trono de España, ocurridos entre el embajador francés y el rey prusiano Guillermo I, Francia declaró la guerra a Prusia el 17 de julio de 1870. La supuesta agresión francesa contribuyó a excitar el sentimiento nacional alemán entre los Estados del sur, que se aliaron con Prusia. Lógicamente, la guerra alteró los planes de Helmholtz. Durante el verano sirvió como cirujano en Heidelberg, preparando un hospital de campaña y dirigiendo la recepción y expedición de los heridos en la estación. En agosto, viajó con un grupo de jóvenes doctores al campo de batalla de Wörth, próximo a la frontera francesa, donde contempló de cerca el horror de la guerra.

Gracias al inesperadamente rápido curso del conflicto, el ejército francés se replegó y en octubre Du Bois-Reymond pudo anunciar a Helmholtz que su nombramiento se produciría a finales de año, aunque a causa de la guerra la construcción del nuevo instituto tendría que posponerse durante un tiempo. Helmholtz estuvo de acuerdo y, a finales de año, viajó a Berlín con su esposa para buscar una vivienda e inspeccionar su laboratorio en la universidad. En Berlín accedieron a todas sus demandas con prontitud y la pareja volvió a Heidelberg para preparar su mudanza.

Poco después, recibió una carta de William Thomson ofreciéndole la dirección del Laboratorio Cavendish de física experimental en Cambridge. Dados sus recientes compromisos, Helmholtz no tuvo más remedio que rechazar la oferta. El 5 de marzo de 1871 toda la sociedad cultural de Heidelberg se reunió en un gran banquete en su honor.

> «Y así, sucedió el hecho irrepetible de que un doctor y profesor de Fisiología ocupó el puesto de físico más importante de Alemania.»
>
> — Emil du Bois-Reymond.

Cuando llegó a Berlín en 1871 Helmholtz se encontraba en la cumbre de su carrera. Nadie podía negar su estatus y su autoridad dentro y fuera de Alemania. Pero los efectos de su gran inquietud científica, abordando un problema tras otro en distintos campos de investigación, pronto comenzaron a rendir cuentas. Aunque su reputación continuó creciendo los años siguientes, hasta convertirse en la personificación de la ciencia alemana (en 1882 el emperador Guillermo I lo distinguió con un título nobiliario), su renombre estaba vinculado sobre todo a los trabajos que había realizado antes de 1871 y a su actual posición institucional, política y cultural.

EL NACIMIENTO DE LA ELECTRODINÁMICA CLÁSICA

Los fenómenos de la electricidad y el magnetismo ya eran conocidos por los griegos. En 1600 William Gilbert (1544-1603) publicó el primer estudio sistemático del magnetismo de los imanes, relacionándolo con el magnetismo terrestre. A partir de los estudios de Otto von Guericke (1602-1686) en Alemania y de Charles François du Fay (1698-1739) en Francia se supo que había dos tipos de electricidad estática: cargas positivas y negativas, que podían producirse frotando el ámbar o el vidrio. Los cuerpos neutros

poseían ambos tipos de cargas, que eran desplazadas al acercar un cuerpo cargado (fenómeno llamado *polarización*). Así, un cuerpo cargado podía atraer a un cuerpo neutro. En 1745 científicos de la Universidad de Leyden (Holanda) construyeron un dispositivo (denominado «botella de Leyden») que era el primer condensador que podía cargarse hasta acumular grandes cantidades de electricidad. En 1753 Benjamin Franklin (1706-1790) consiguió cargar una botella de Leyden conectando una cuerda húmeda con las nubes tormentosas mediante una cometa.

En 1785 Charles-Augustin de Coulomb (1736-1806), a través de una balanza de torsión de su invención, descubrió que la fuerza eléctrica entre dos cargas era inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Al mismo tiempo que Coulomb, Henry Cavendish (1731-1810) descubrió las leyes de las interacciones eléctricas (figura 1) y magnéticas, aunque nunca publicó sus descubrimientos. En 1786 Luigi Galvani (1737-1798) realizó sus famosos experimentos con las corrientes eléctricas producidas al poner en contacto el anca de una rana con dos metales diferentes. En 1800 Alessandro Volta (1745-1827) demostró que la corriente galvánica era de origen inorgánico y se producía también en una disolución salina, introduciendo dos electrodos o alambres soldados de metales diferentes. La pila voltaica consistía en láminas, alternadamente de cobre y cinc, separadas por trozos de paño impregnados por una disolución salina. El cinc cede electrones al cobre, acumulándose las cargas negativas en un extremo y las positivas en el otro, lo que produce una *diferencia de potencial.*

El experimento de interacciones eléctricas. Las cargas de igual signo se repelen y las cargas de distinto signo se atraen.

FIG. 1

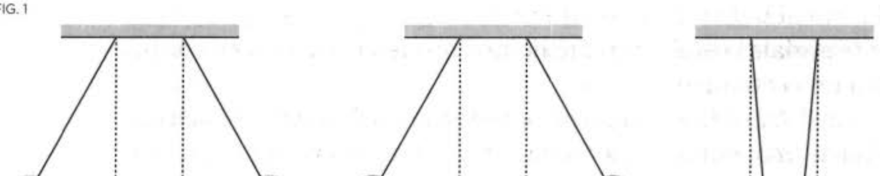
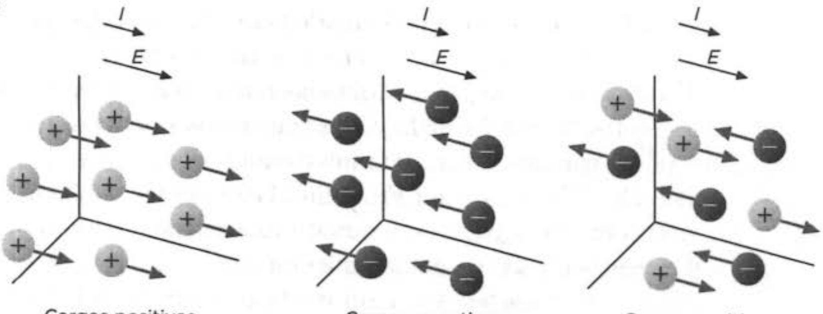


FIG. 2



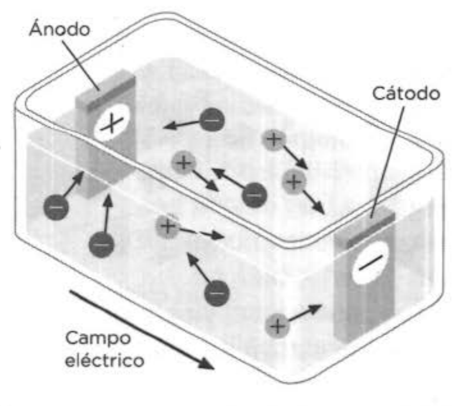
Por tanto, entre los bornes de la pila existe un campo eléctrico, que es capaz de producir movimiento de las cargas libres y, en consecuencia, una corriente eléctrica (figura 2).

Una corriente eléctrica (*I*) es un chorro de cargas eléctricas en movimiento por la acción de un campo eléctrico (*E*).

Sin embargo, los conocimientos sobre el magnetismo prácticamente no avanzaron durante varios siglos. La electricidad estática no afectaba a los imanes. Pero en 1820, en Copenhague, Hans Christian Ørsted (1777-1851) descubrió que una corriente eléctrica podía mover la aguja de una brújula. Existía una relación entre el magnetismo y la electricidad en movimiento; a este fenómeno lo llamó *electromagnetismo*. En 1827 André-Marie Ampère (1775-1836) formuló la teoría del electromagnetismo, basándose en sus experimentos. Dos alambres paralelos se atraían cuando transportaban corrientes eléctricas en la misma dirección y se repelían si la dirección era opuesta. Una espira de alambre que podía girar sobre un eje se comportaba como la aguja de una brújula, orientándose al norte. Ampère imaginó que el magnetismo de los materiales estaba producido por pequeñas corrientes circulares a nivel atómico.

En 1827 el físico alemán Georg Simon Ohm estudió la intensidad de una corriente eléctrica al conectar un material conductor a los dos polos de una pila voltaica. Al conectar varias pilas la intensidad de la corriente aumentaba proporcionalmente al número de pilas, lo que le permitió formular la ley de Ohm: $V = IR$, donde V es el voltaje, que es proporcional al número de pilas y se mide

FIG. 3



En el fenómeno de la electrólisis de Faraday los iones se mueven bajo la acción del campo eléctrico producido por los electrodos cargados.

en *voltios*; I es la intensidad de la corriente, que se mide en *amperios*, y la *resistencia* R depende del material del conductor por el que circula la corriente y se mide en *ohmios*.

El londinense Michael Faraday culminó los estudios sobre la electricidad y el magnetismo. A los veinte años descubrió la electrólisis, el fenómeno de la descomposición química mediante la corriente eléctrica (figura 3), y en 1831 realizó su descubrimiento más importante: la inducción magnética. Un campo magnético variable, por ejemplo, un imán en movimiento, inducía una corriente eléctrica en un circuito. El físico americano Joseph Henry (1797-1878) también había observado el mismo fenómeno. La ley de inducción se conoce como ley de Faraday-Henry.

EL CAMPO ELECTROMAGNÉTICO

Las investigaciones sobre la electricidad y magnetismo que culminaron con los descubrimientos de Faraday revelaron que existían fuerzas *electrodinámicas* entre imanes, cargas y corrientes. A mediados del siglo XIX no existía una teoría general de la electrodinámica. La situación era confusa, pues se tenían datos experimentales de algunos procesos y no de otros. Ciertas partes no habían sido formuladas matemáticamente y no todas las fórmulas que se manejaban encajaban entre sí.

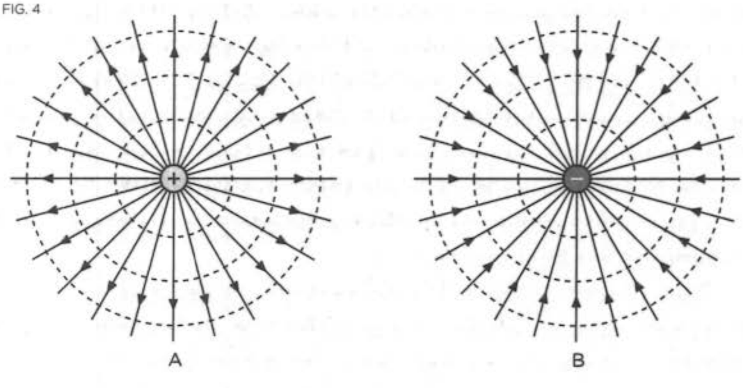
Antes de que Helmholtz publicara su propia teoría de la electrodinámica en 1870, existían dos puntos de vista generales para tratar el problema. El más antiguo, desarrollado en la década de 1840 por Wilhelm Eduard Weber (1804-1891), postulaba que la

carga consistía en dos tipos de partículas y la corriente eléctrica era un flujo igual y opuesto de estos dos tipos de partículas en un conductor.

El punto de vista más novedoso fue propuesto por Faraday, que introdujo el concepto de *campo*. Este científico imaginó que el espacio intermedio entre las cargas y los imanes no estaba vacío, sino ocupado por un campo, una sustancia invisible capaz de ejercer una fuerza. Faraday concebía el campo como un sistema de tubos o líneas de fuerza. Las líneas del campo magnético eran fácilmente visibles esparciendo limaduras de hierro sobre una superficie cerca de un imán. De la misma forma existían líneas del campo eléctrico (figura 4). Todos los fenómenos podían describirse con campos. El fenómeno de la inducción magnética se producía cuando un imán se acercaba a un alambre. Entonces sus líneas de campo atravesaban el alambre y esto producía una corriente.

La formulación matemática de las leyes de los campos eléctricos y magnéticos fue realizada por James Clerk Maxwell (1831-1879), que se propuso simplificar y reducir toda la información. Maxwell publicó su primer artículo «Sobre las líneas de fuerza de Faraday» en 1855, donde asemejó las líneas de campo a las líneas de transporte en un fluido. En 1865 plasmó las leyes de la electrodinámica en las *ecuaciones generales del campo electro-*

FIG. 4



Líneas de fuerza del campo eléctrico producido por una carga positiva (A) y otra negativa (B).

magnético, que inicialmente eran un sistema de veinte ecuaciones diferenciales ordenadas en ocho categorías; en 1883 Oliver Heaviside (1850-1925) las reescribió como las cuatro ecuaciones vectoriales que conocemos hoy.

La teoría de Maxwell predecía la existencia de ondas electromagnéticas. Si se hacía pasar una corriente oscilante por un conductor, esto produciría un movimiento pendular de las cargas internas y, por tanto, un campo eléctrico oscilante. De la misma forma, la corriente pasaría de ser positiva a ser negativa, lo que produciría también un campo magnético oscilante. Estos dos campos eléctrico y magnético oscilantes se propagarían en todas las direcciones perpendiculares al hilo conductor, similarmente a las ondas de sonido. Ambos campos serían perpendiculares en cada punto del espacio y oscilarían en direcciones perpendiculares a la dirección de propagación. Las ecuaciones de Maxwell predecían que la velocidad de propagación debía ser próxima a la velocidad de la luz. La existencia de dichas ondas fue confirmada experimentalmente por Henrich Hertz, que había sido alumno y asistente de Helmholtz en Berlín.

LA ELECTRODINÁMICA DE HELMHOLTZ

Helmholtz desarrolló su teoría de la electrodinámica principalmente en tres artículos elaborados entre 1870 y 1872. Esta teoría se basaba en lo que llamaba un *potencial generalizado*, a partir del cual se podía obtener la energía del sistema, y que englobaba como caso particular la teoría de Maxwell. Helmholtz tenía un punto de vista radical para aproximarse a la electrodinámica, basado en la conservación de la energía. Aunque los detalles técnicos y las implicaciones de su electrodinámica eran complejos, su fundamento era bastante intuitivo.

Para el investigador, los objetos que interaccionaban en el laboratorio eran entidades que podían estar en distintos estados: cargado, descargado o conduciendo una corriente. La magnitud relevante era la *energía de interacción*, que estaba determinada

HERTZ Y LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS



Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) nació en Hamburgo y comenzó a estudiar en Berlín en 1878 con Helmholtz, quien lo instruyó en sus teorías y métodos de investigación. Fue Helmholtz quien le propuso estudiar un problema que previamente había propuesto a sus estudiantes para optar a un premio en física: se trataba de diseñar un experimento que demostrara la intensidad de las corrientes de desplazamiento retardadas que debían aparecer en un conductor tras una interrupción súbita de la corriente, debidas a la inercia. Hertz fue asistente de Helmholtz hasta 1883, año en el que se trasladó a Kiel como profesor de Física. En 1885 fue nombrado profesor ordinario de Física en el Instituto Técnico de Karlsruhe. Tras la muerte de Kirchhoff en 1887 y la de Clausius en 1888, Helmholtz le ofreció elegir entre las cátedras de Física de Berlín y Bonn. Hertz eligió el puesto de Bonn. En 1888 anunció los resultados de sus experimentos con ondas electromagnéticas, estableciendo firmemente la relación entre la luz y la electricidad. Mediante una corriente oscilante en un circuito (el emisor) se producían ondas electromagnéticas que producían chispas al alcanzar una espira conductora (el receptor) a cierta distancia (de la misma manera que se observan chispas si introducimos un objeto metálico en un horno de microondas). Hertz consiguió producir ondas electromagnéticas de radio de varios metros de longitud, hasta ondas más cortas de 33 cm. Comprobó que dichas ondas se comportaban igual que la luz, y podían ser focalizadas usando espejos cóncavos. Demostró su propagación lineal y la formación de sombras si se colocaba un obstáculo entre el emisor y el receptor. La unidad de frecuencia en el sistema internacional de unidades se denominó *hercio* en su honor (1 Hz = 1 oscilación por segundo).

por los estados de las cargas y corrientes en un instante y por su separación mutua. Si se producía una perturbación (o variación) de los estados de estos objetos o de su distancia, se alteraba su energía. Entonces debía aparecer una fuerza para conservar la energía. En otras palabras, la fuerza debía deducirse a partir de la energía o *potencial* del sistema.

Sin embargo, la teoría de Helmholtz no era tan fundamental como la de Maxwell. Tampoco contribuyó con resultados experimentales destacables. En lugar de eso, jugó un papel «instrumental» en la formación de la electrodinámica clásica, a través de su análisis crítico de los trabajos de otros investigadores. Además, constituyó un guía inspirador para los físicos que pasaban por su laboratorio, principalmente Hertz, su estudiante más sobresaliente, y Ludwig Boltzmann (1844-1906). Helmholtz jugó un papel fundamental en dar forma a la electrodinámica clásica de Maxwell y condujo a toda una generación de físicos alemanes a reconocer sus posibilidades. Resulta irónico que la mayor contribución de Hertz (el descubrimiento de las ondas electromagnéticas) llegara a cuestionar la propia teoría electrodinámica de Helmholtz.

«Para Helmholtz la finalidad de la física era descubrir qué estados podían tener los objetos y cuáles podían ser las formas de sus energías de interacción.»

— **Jed Z. Buchwald, profesor de Historia de la Ciencia del MIT.**

Además de la electrodinámica, en las décadas de 1870 y 1880 Helmholtz abordó prácticamente todas las ramas de la física teórica y la física matemática. Pero su interés en cada uno de estos campos se desvaneció relativamente pronto. A pesar de la naturaleza crítica de sus contribuciones a la teoría electrodinámica, sus ideas no llegaron a extenderse. De modo similar, aunque sus trabajos en termodinámica química ayudaron a allanar el camino de la nueva física química y los de los sistemas monocíclicos ayudaron a clarificar las ideas de Boltzmann, Helmholtz abandonó sus estudios en estos campos, que avanzaron sin él.

La amplitud de los trabajos de Helmholtz puso de manifiesto su dominio de la física, tanto teórica como experimental. Su prestigio en Europa y América no dejó de crecer, siendo considerado una de las grandes personalidades de la ciencia mundial. Así, en la Pascua de 1881 fue invitado por la Sociedad de Química de Londres para impartir una conferencia en honor a Faraday (después viajó a Cambridge, donde fue investido Doctor en

FUERZA MAGNÉTICA ENTRE CORRIENTES ELÉCTRICAS

Una corriente eléctrica produce un campo magnético. A su vez, un campo magnético ejerce una fuerza sobre un circuito por el que circula una corriente eléctrica. Como consecuencia, dos circuitos por los que circule corriente ejercerán entre sí una fuerza de tipo magnético, como si fueran dos imanes. Dos corrientes paralelas en el mismo sentido se atraen y, si tienen sentidos opuestos, se repelen. Este resultado se puede extender a corrientes de cualquier forma, como las de la figura 1A, que se atraen, y las de la figura 1B, que se repelen. El valor de la corriente eléctrica se expresa en amperios. La definición de amperio se ilustra en la figura 2A: dos corrientes paralelas de un metro de longitud, separadas un metro, por las que circula un amperio, ejercen una fuerza de $2 \cdot 10^{-7}$ newtons. En la figura 2B se ilustra un método para medir con una balanza la fuerza ejercida entre dos corrientes. En este caso la sección central del conductor, de longitud L, está conectada a un brazo de la balanza, y colgada de dos muelles que se estiran, debido a la interacción con la sección inferior, situada a una distancia R, cuando circula la corriente I.

FIG. 1

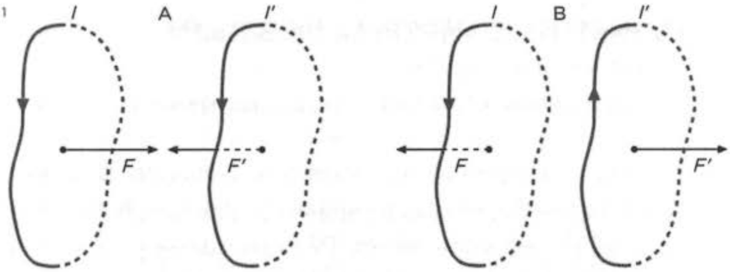
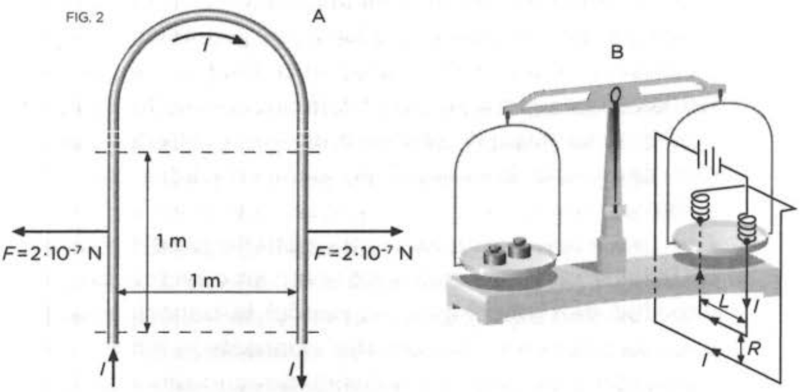


FIG. 2



Leyes). Su lección, titulada «Los recientes avances de las ideas de Faraday sobre la electricidad», fue impartida en inglés y es uno de sus más brillantes y profundos discursos. Tras una exposición de las teorías de Faraday-Maxwell, Helmholtz habló sobre los átomos y la relación entre la electricidad y las propiedades químicas. El entusiasmo de la audiencia, reflejado en las ovaciones que siguieron a su disertación, fue tal que William Thomson le pidió que impartiera en Inglaterra un ciclo de conferencias en el otoño de aquel mismo año. Tras agradecer el ofrecimiento, Helmholtz tuvo que excusarse, aduciendo que preparar lecciones en inglés le llevaba demasiado tiempo y que tenía serias razones para no desperdiciarlo, ya que iba a cumplir los sesenta años y aún tenía mucho trabajo que realizar.

EL INSTITUTO IMPERIAL DE BERLÍN

Los modernos laboratorios e institutos de física tienen su origen en el siglo XIX. Fue entonces cuando se creó el vínculo entre la física y el progreso industrial y tecnológico. El desarrollo de la física fue meteórico y, a finales de siglo, se había erigido como la reina de las ciencias en los cuatro países más desarrollados industrialmente, es decir, Inglaterra, Francia, Alemania y Estados Unidos. Muchos físicos concluían que el fin de la física estaba cerca, ya que pensaban que las leyes generales de la naturaleza ya estaban totalmente establecidas. Parecía que la tarea de los físicos debía centrarse en la consolidación de los conocimientos, mediante medidas de precisión de las constantes y de las unidades. Establecer los estándares de las medidas era clave para el progreso.

Todas las instituciones de prestigio poseían un laboratorio de física y un físico eminente como su director. En 1869 la Universidad de Cambridge comprendió la importancia de cultivar el conocimiento de las grandes ramas de la física experimental: calor, electricidad y magnetismo. Se creó una cátedra de Física Experimental, con dotación para laboratorios, aulas e instrumen-

tos. William Cavendish, duque de Devonshire, financió el proyecto. William Thomson era el candidato obvio para ser el primer profesor de Física experimental. Pero Thomson no deseaba dejar Glasgow. Se pensó entonces en Helmholtz, pero él ya había aceptado la cátedra de Física en Berlín. Finalmente, en 1871, el puesto fue aceptado por James Clerk Maxwell, que lo dirigió desde su apertura en 1874 hasta su muerte en 1879. Entonces se hizo cargo de él lord Rayleigh (1842-1919) y, cinco años más tarde, J.J. Thomson (1856-1940). El Laboratorio Cavendish se convirtió en el más prestigioso de Inglaterra, donde se formaban físicos experimentales y se realizaban todo tipo de medidas de precisión.

Los nuevos institutos de física en Alemania se convirtieron en los rivales directos del Laboratorio Cavendish. Algunos físicos alemanes solicitaron al nuevo Gobierno de Berlín una institución dedicada a la investigación y no a la enseñanza. Insistían en el papel central que jugaba la física para el futuro de la supremacía industrial del Reich. El resultado fue la creación del Instituto Imperial de Física y Tecnología en 1887, dirigido por Helmholtz y dedicado a la investigación física como un arma del Estado imperial.

> «La investigación científica no es una actividad profesional en la estructura del Estado. Es solo una actividad privada de los científicos tolerada dentro de su profesión.»
>
> — Werner von Siemens.

Los recursos que algunos Estados germánicos dedicaban a sus institutos de física eran ya formidables. Durante la década de 1870, Prusia asignó más de un millón y medio de marcos al instituto de Helmholtz en Berlín. Pero el poderoso e influyente industrial Werner von Siemens pensaba que esto no era suficiente; creía que financiar solo la enseñanza de la física impedía el progreso en la investigación. Los institutos producían legiones de profesores en lugar de experimentadores que pudieran contribuir realmente al desarrollo del Reich. La solución era una nueva institución imperial dedicada a la investigación.

WERNER VON SIEMENS (1816-1892)



Siemens fue el fundador de la actual empresa Siemens-AG y una personalidad poderosa en la nueva Alemania del siglo XIX. Él y su hermano Wilhelm hicieron sus fortunas como pioneros en las nuevas industrias eléctricas que emergieron durante la segunda mitad del siglo. Mientras Werner se encargaba de los asuntos en Alemania, su hermano emigró a Inglaterra y adoptó la nacionalidad británica. Durante la década de 1840, Siemens estaba al frente de la telegrafía alemana. Se consideraba un físico tanto como un industrial. Siemens decía que «mi amor siempre ha pertenecido a la ciencia, mientras que mi trabajo y mis logros se basan principalmente en el campo de la tecnología». En 1884 Siemens ofreció financiar la creación del Instituto de Física del Reich, con Helmholtz a su cabeza.

Ya en 1872, un grupo de científicos, incluyendo a Helmholtz, Du Bois-Reymond y el director del observatorio de Berlín Wilhelm Foerster (1832-1921), habían escrito al emperador sobre la necesidad de crear un instituto dedicado a las medidas de precisión y a la instrucción técnica. En junio de 1883, una comisión, encabezada por Helmholtz y Siemens, elaboró la primera memoria para la fundación de un «instituto para la promoción experimental de la ciencia de la exactitud y de las técnicas de precisión». Este instituto tendría dos departamentos: uno físico y otro técnico. Este último sería responsable de seleccionar problemas científicos y de administrar el instituto, mientras que el primero desarrollaría nuevas investigaciones experimentales. La sección técnica se subdividía en cinco subsecciones, representando las áreas en las que el Reich aspiraba a la supremacía industrial: materiales, mecánica de precisión, óptica, termometría y estándares eléctricos.

En su memoria de 1883 Helmholtz subrayaba la necesidad de realizar investigación básica, ya que todo trabajo científico serio

termina eventualmente encontrando una aplicación práctica, aunque esta no se hubiera previsto. Ponía el ejemplo de la astronomía. Además de haber revolucionado nuestra concepción del mundo, la navegación marítima y la medida del tiempo cronológico dependían estrechamente de ella. La óptica aplicada, la construcción de relojes, las medidas refinadas de longitudes y ángulos, se habían desarrollado directamente a partir de los problemas estudiados por esta disciplina.

Las líneas de investigación del departamento científico propuestas por Helmholtz eran las siguientes:

1. La determinación exacta de la intensidad de la gravedad en distintos lugares de la superficie terrestre.

2. La medida absoluta de la gravitación o la determinación de la densidad media de la Tierra.

3. La determinación exacta de la velocidad de la luz en unidades terrestres.

4. La constante de la teoría de la acción magnética entre corrientes eléctricas (era una velocidad que parecía ser exactamente igual a la de la luz y que podía aportar información sobre aspectos desconocidos de los fenómenos electromagnéticos; se trataba de las ondas electromagnéticas descubiertas por Hertz, cinco años después, en 1888).

5. La determinación de las unidades eléctricas de medida.

6. La medida de la presión y la densidad de gases y vapores a diferentes temperaturas y la medida de la cantidad de calor consumida en estos procesos.

Sin embargo, el desarrollo del proyecto se retrasó por dificultades de financiación y por la cuestión de encontrar una ubicación adecuada. En mayo de 1884 Siemens ofreció al emperador medio millón de marcos y una hectárea de terreno en Charlot-

tenburg. Siemens comenzó a construir el instituto en 1886 y, en abril de 1887, Helmholtz fue oficialmente invitado a ser el primer presidente del nuevo Instituto Imperial de Física y Tecnología. El investigador aceptó bajo sus acostumbradas condiciones económicas y científicas. Tuvo que dejar su puesto en la Universidad de Berlín, pero continuó ligado a aquella institución académica, declarando su voluntad de impartir una lección pública de no más de dos o tres horas cada semestre. En abril de 1888 se consumó su nombramiento como director del Physikalisch-Technische Reichsanstalt.

«Su prematura muerte, en plena posesión de sus facultades, fue sentida, no solo como una pérdida irreparable para la ciencia, sino como una desgracia nacional.»

— Emile du Bois-Reymond.

El edificio estaba construido sobre una gruesa losa de hormigón de 1 000 m^2, para otorgarle la máxima estabilidad, y los muros exteriores estaban aislados de la luz solar directa para mantener una temperatura constante. Cada planta estaba dedicada a un campo de investigación diferente. La termodinámica se desarrollaba en la planta baja para facilitar un mayor control de la temperatura; los estudios dedicados a la electricidad y la óptica tenían lugar en el piso superior, y el piso medio estaba dedicado a las oficinas y la biblioteca. Había un observatorio y un edificio separado, libre de hierro, para experimentos de magnetismo. Estas instalaciones no tenían rival en el mundo.

Bajo la dirección de Helmholtz, la sección científica estaba dividida en tres laboratorios dedicados al estudio del calor, la electricidad y la óptica. El laboratorio de calor buscaba encontrar nuevos materiales para termómetros, mejorar la exactitud en las medidas de altas temperaturas y perfeccionar el diseño de los motores térmicos (eran todos proyectos de precisión). El laboratorio eléctrico tenía la finalidad de competir con el de Cavendish proporcionando estándares eléctricos exactos y fiables (de interés para Siemens) y experimentar con los efectos magnéticos. Así,

por ejemplo, desarrollaban experimentos para la Armada con el fin de minimizar los efectos disruptivos del hierro en los compases de los barcos. La principal ocupación del laboratorio de óptica era establecer estándares fiables en las medidas lumínicas, aspecto particularmente importante, ya que Alemania era líder en instrumentación óptica. Otto Lummer (1860-1925), que fue estudiante de Helmholtz, trabajó allí para desarrollar un fotómetro fiable (un instrumento para comparar la intensidad de luz de varias fuentes).

En definitiva, la finalidad del Instituto Imperial era establecer estándares de precisión que pudieran ser de uso industrial y, en última instancia, demostrar la superioridad alemana en la física de precisión, como advertencia a sus competidores industriales del resto de Europa y América. (Más de un siglo después, el centro continúa realizando medidas de precisión bajo el nombre de Agencia Alemana de Metrología.)

En septiembre de 1894 el peor de los desastres golpeó el Instituto Imperial: Helmholtz murió. No era fácil encontrar a quien lo reemplazara y no se veía claro el futuro del Reichsanstalt sin Helmholtz, ya que básicamente fue construido a medida para su persona. Finalmente fue sustituido por Friedrich Kohlrausch (1840-1910), físico experimental que estudió con Wilhelm Weber y que fue codirector, junto con él, del Instituto de Física de Gotinga. Bajo la dirección de Kohlrausch, el Instituto Imperial se expandió, llegando a doblar su tamaño en 1903.

MUERTE DE HELMHOLTZ

En agosto de 1893 tuvo lugar la Exposición Universal de Chicago. Helmholtz fue invitado a asistir como delegado de Alemania, ya que era la mayor autoridad científica del país y el representante más influyente de la ciencia alemana. Tanto él como su esposa tuvieron dudas con respecto a si debía emprender tan largo viaje, puesto que entonces tenía setenta y dos años. Debido a ello, el Gobierno incrementó su dotación económica con el fin de que su mujer pudiera acompañarle.

El 6 de agosto embarcaron en el *SS Lahn* en el puerto de Bremerhaven. Helmholtz iba acompañado por un grupo de físicos. El matemático Felix Klein (1849-1925) también viajaba en el barco y tuvo ocasión de discutir con él sobre los axiomas de la geometría espacial. El día siguiente Anna advirtió a Klein que no debía discutir problemas tan complicados con su marido, ya que este se fatigaba demasiado. El 17 de agosto llegaron a Nueva York y desde allí viajaron a Chicago, donde la exposición comenzó el 21 de agosto. En septiembre emprendieron un viaje hasta Denver, en un sucio e incómodo tren. Recorrieron las montañas Rocosas hasta Colorado Springs y emprendieron el viaje de vuelta por San Luis, hasta las cataratas del Niágara y, luego, visitaron Boston y Nueva York. El viaje fue más interesante que agradable; América impresionó a Helmholtz por sus grandes dimensiones y por las tremendas empresas que allí se habían realizado. El viaje finalizó con una visita a institutos y universidades de Washington, Filadelfia y Baltimore.

El viernes 6 de octubre de 1893 a las 7 de la mañana embarcaron a bordo del *Saale* que les llevaría de regreso a Europa. Klein viajaba a bordo y fue testigo del trágico accidente que provocaría la muerte de Helmholtz al año siguiente:

> Alrededor de las diez de la noche, Helmholtz, el doctor Molton, el capitán Rings y yo, estábamos sentados en la sala de fumadores, con el mar en calma. Helmholtz se levantó diciendo que era hora de ir a la cama y bajó por las empinadas escaleras que conducían al salón. Entonces escuchamos una fuerte caída, a la que yo al principio no presté atención. Entonces Molton gritó: «Algo le ha ocurrido a Helmholtz», tras lo cual todos corrimos hacia abajo, a tiempo para ver como Helmholtz era levantado por varios camareros; había un charco de sangre en el suelo.

Klein corrió a avisar a Anna, y la condujo al camarote del médico. Helmholtz yacía sangrando por la frente y la nariz, pero estaba consciente y era capaz de responder a las preguntas del médico. Evidentemente había perdido la consciencia por uno de sus viejos ataques, ya que no llegó a usar sus manos para pro-

tegerse en la caída y su cara impactó contra el suelo. La pronta intervención del doctor Molton impidió que muriera.

El 17 de octubre llegaron a Bremen, donde Helmholtz recibió atención médica. Tras ocho días partieron hacia Berlín. En noviembre estaba recuperado y pudo reemprender sus obligaciones en el Instituto Imperial. Sin embargo, las secuelas del accidente le impedían trabajar como antes y a veces veía doble.

Hasta el 11 de julio de 1894 su mente estuvo en plena actividad. Redactó el prefacio de la obra póstuma de Hertz, *Principios de mecánica*, y publicó dos artículos: «Apéndice al tratado sobre el principio de mínima acción en electrodinámica» y «Sobre el origen de la correcta interpretación de nuestras impresiones sensoriales». La mañana del 12 de julio sufrió una parálisis mientras se hallaba en el Instituto Imperial. La parálisis, provocada por una hemorragia cerebral, evolucionó lentamente los siguientes días. Sus pensamientos eran confusos y erráticos, con intervalos de lucidez. El día de su cumpleaños, el 31 de agosto, fue el último de relativa claridad. Al siguiente aparecieron nuevos síntomas de parálisis y su fuerza vital fue agotándose gradualmente, hasta que, el 8 de septiembre, le sobrevino la muerte.

En una de sus últimas fotografías, tomada en 1894, poco antes de morir, Helmholtz aparecía de pie impartiendo una lección, y tras él una pizarra repleta de fórmulas. Su mirada expresaba cierta tristeza o melancolía, quizá porque sabía que inexorablemente se acercaba su fin y con él finalizaba una era científica gloriosa.

Lecturas recomendadas

ASIMOV, I., *Introducción a la ciencia*, Barcelona, Orbis, 1986.

BORING, E.G., *Historia de la psicología experimental*, México, Trillas, 1978.

CREASE, R.P., *The Great Equations*, Nueva York, W.W. Norton & Company, 2008.

GAMOW, G., *Biografía de la física*, Madrid, Alianza Editorial, 2007.

GOETHE, J.W., *Teoría de los colores*, en *Obras completas tomo 1*, Madrid, Aguilar, 1963.

GOLDÁRAZ, J., *La teoría armónica después de Francisco de Salinas*, en *Francisco de Salinas, música, teoría y matemática en el Renacimiento*, A. García y P. Otaola (coords.), Salamanca, Ediciones Universidad de Salamanca, 2014.

GRIBBIN, J., *Historia de la ciencia, 1543-2001*, Barcelona, Crítica, 2003.

MÜLLER, J., *Los fenómenos fantásticos de la visión*, Madrid, Espasa-Calpe, 1946.

SAGAN, D. y SCHNEIDER, E., *La termodinámica de la vida*, Barcelona, Tusquets, 2008.

Índice